



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## VÝVOJ METODY PRO HODNOCENÍ REŽIMU MAZÁNÍ VE VALIVÉM LOŽISKU

DEVELOPMENT OF METHOD FOR LUBRICATION REGIME EVALUATION IN ROLLING BEARING

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Valenta

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2020



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Jakub Valenta**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Konstrukční inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Šperka, Ph.D.**  
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Vývoj metody pro hodnocení režimu mazání ve valivém ložisku

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Valivá ložiska představují strojní součást, která se používá od miniaturních v hodinových strojích až po velká ložiska ve větrných elektrárnách. V mnoha aplikacích je udržení nepřetržitého provozu zcela zásadní a opak má významné ekonomické důsledky. Spolehlivý chod ložisek často závisí na udržení kvalitního mazání. Chytrá ložiska poskytují možnost monitorování stavu mazání v reálném čase a dovolují dělat automatické zásahy pro zvýšení životnosti či spolehlivosti. Prvním krokem pro jejich realizaci je vývoj zařízení a metody umožňující hodnocení režimu mazání ve valivém ložisku za pomocí vhodných měřicích metod.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

**Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem je vyvinout metodu a zrealizovat zařízení, které umožní hodnotit režim mazání valivého ložiska za chodu.

Dílčí cíle diplomové práce:

- zpracovat přehled možností snímání aplikovatelných na valivá ložiska,
- navrhnout a zrealizovat zařízení pro měření na ložisku,
- vyvinout metodu pro hodnocení režimu mazání,
- získat výsledky pro různé podmínky rychlosti, teploty a maziva,
- analyzovat výsledky a navrhnout další vývoj.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonzeni/>

**Seznam doporučené literatury:**

HEEMSKERK, R. S.; VERMEIREN, K. N.; DOLFSMA, H. Measurement of lubrication condition in rolling element bearings. ASLE TRANSACTIONS, 1982, 25.4: 519-527.

JABLONKA, K.; GLOVNEA, R.; BONGAERTS, J. Evaluation of EHD films by electrical capacitance. Journal of physics D: applied physics, 2012, 45.38: 385301.

WAN IBRAHIM, M. K.; GASNI, D.; DWYER-JOYCE, R. S. Profiling a ball bearing oil film with ultrasonic reflection. Tribology Transactions, 2012, 55.4: 409-421.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

.....  
prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

.....  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce si dává za úkol vývoj měřicí metody pro vyhodnocení režimu mazání ve valivém ložisku. První část mapuje několik měřicích metod, podle kterých lze hodnotit režim mazání. Na základě posouzení této části byly vybrány elektrické monitorovací metody. Pro aplikaci těchto metod bylo zkonstruováno testovací zařízení s valivým ložiskem. Konkrétní měřicí řetězce na bázi vybraných metod byly navrženy a ověřeny pomocí prvotních testů na tribometru *ball-on-disk*. Dle výsledků z těchto prvotních měření byl vybrán a aplikován vhodný měřicí řetězec na vyrobené testovací zařízení. Nakonec proběhlo úspěšné měření parametru mazání na valivém ložisku. Dodatečně byly provedeny další testy zabývající se vlivem teploty a typu oleje na samotné měření.

## KLÍČOVÁ SLOVA

monitorovací metody, valivé ložisko, mazaný kontakt, měřicí řetězec, ball-on-disk tribometr

## ABSTRACT

The aim of this master's thesis is to develop measuring methods for evaluation of the lubrication regime in a rolling bearing. The first part of thesis maps several measuring methods according to which the lubrication mode can be evaluated. Based on the assessment of this part, electrical monitoring methods were selected. For application of these methods was constructed testing device with rolling bearing. Specific measuring chains based on selected methods were designed and verified by using initial tests on a ball-on-disk tribometer. According to the results of these initial measurements was selected and applied suitable measuring chain to the selected test device. In the end, there was a successful measuring the lubrication parameter on the rolling bearing. Additionally, other tests dealing with the influence of temperature and type of oil on the measurement itself were performed.

## KEY WORDS

monitoring methods, rolling bearing, lubricated contact, measuring chain, ball-on-disk tribometer



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VALENTA, Jakub. *Vývoj metody pro hodnocení režimu mazání ve valivém ložisku*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124332>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Petr Šperka.





## PODĚKOVÁNÍ

Především bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Petr Šperka, Ph.D. za odborné vedení a společné diskutování nad danou problematikou. Dále bych chtěl poděkovat kolegům, kteří mi byli nápomocní při řešení práce. Rovněž nelze opomenout poděkovat kolektivů třídy, za vzájemnou podporu. Závěrem bych chtěl poděkovat přítelkyni, přátelům a rodině za starostlivost a pomoc.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Petr Šperka, Ph.D., Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Jakub Valenta



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Konstrukce a mazání valivých ložisek	14
2.1.1	Konstrukce valivých ložisek	14
2.1.2	Mazání valivých ložisek	15
2.2	Základní druhy poškození ložisek	19
2.3	Klasické způsoby sledování provozního stavu ložiska	20
2.4	Metody pro hodnocení stavu mazání	22
2.4.1	Měření dle odporu	22
2.4.2	Měření dle kapacity	25
2.4.3	Měření dle ultrazvuku	30
2.4.4	Měření pomocí optického interferometru s optickým vláknem	33
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>35</b>
3.1	Analýza problému	35
3.2	Analýza a zhodnocení řešerše	35
3.3	Cíl práce	37
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>38</b>
4.1	Postup řešení	38
4.2	Testovací zařízení	39
4.2.1	Projekty Ústavu konstruování z roku 2017 a 2019	39
4.2.2	Koncepční návrh zařízení	42
4.2.3	Zapojení elektrického obvodu	43
4.2.4	Zajištění testovaného ložiska v domku	45
4.2.5	Způsob zatěžování	47
4.2.6	Navrhované materiály pro výrobu	48
4.3	Měřicí řetězec	49
4.3.1	Vývoj měřicího řetězce	49

<b>5</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>51</b>
5.1	Testovací zařízení	51
5.1.1	Domek s testovaným ložiskem	53
5.1.2	Ložiskové těleso	62
5.1.3	Vybrané testované ložisko a jeho úpravy	63
5.1.4	Posouzení bezpečnosti hřídele	64
5.1.5	Rám	65
5.1.6	Pohon	65
5.1.7	Zatěžování	66
5.1.8	Použité materiály	67
5.1.9	Tepelná analýza vedení tepla	67
5.2	Měřicí řetězec	69
5.2.1	Obvod 1 (DC)	69
5.2.2	Obvod 2 (AC)	72
5.2.3	Obvod 3 (AC)	78
5.3	Prvotní testy na tribometru ball-on-disk	82
5.3.1	Výsledky z měření na tribometru dle metod udávajících informaci o kovovém dotyku	83
5.3.2	Výsledky z měření na tribometru dle metod zjišťujících kapacitu kontaktu	90
5.3.3	Celkové zhodnocení měření na tribometru ball-on-disk	96
5.4	Aplikace měřicího řetězce na měřicí zařízení	97
5.4.1	Měření parametru mazání dle četnosti dotyku na obvodu 2	98
5.4.2	Měření parametru mazání dle kapacity na obvodu 2	100
5.4.3	Vliv teploty na měření	103
5.4.4	Vliv typu oleje na měření	104
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>106</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>108</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>109</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>112</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>114</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>118</b>
<b>PŘÍLOHA 1</b>		<b>119</b>

# 1 ÚVOD

Valivé ložisko je hojně užívaný díl mnoha konstrukcí, kde slouží k výrazné redukci tření mezi vzájemně pohybujícími se strojními součástmi. Na základě testování je vyčíslena jeho pravděpodobná trvanlivost, avšak konkrétní životnost daného ložiska se může výrazně lišit dle provozních podmínek. Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících trvanlivost ložiska je kvalita jeho mazání.

Běžné diagnostické principy monitorování valivých ložisek se zaměřují na projevy značící až konec funkce ložiska. Naproti tomu přímé monitorování olejového filmu ložiska v reálném čase by odhalilo problémy s mazáním, které vedou ke zkrácení životnosti ložiska nebo k nečekanému konci jeho funkce. Použitím přímého monitorování mazacího filmu, jež by spolupracovalo s mazací soustavou ložiska a dalšími senzory, by vedlo k sestavení zařízení označovaného jako „chytré ložisko“.

Hlavní problém přímého monitorování olejového filmu spočívá v přenesení zjednodušených fyzikálních modelů do reálného provozu, kde měření ovlivňuje mnoho neznámých, které nelze jednoduše definovat. Aby bylo přímé monitorování uskutečnitelné, je nutné se co nejvíce přiblížit reálnému provozu v laboratorních podmínkách.

Existuje mnoho aplikací, kde je důležité zabezpečit spolehlivý chod a maximalizovat životnost, např. větrné elektrárny v pobřežních vodách (viz Obr. 1-1). Zkrácená doba trvanlivosti ložiska, či dokonce jeho nečekaný výpadek má za následek významné finanční ztráty. Zde by monitorování mazacího filmu vedlo ke spolehlivějšímu chodu ložiska s větší mírou predikce jeho selhání.



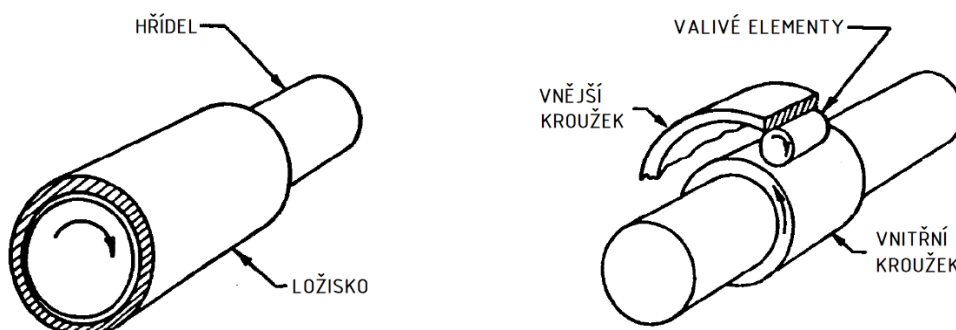
Obr. 1-1 Větrné elektrárny na moři [38]

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Konstrukce a mazání valivých ložisek

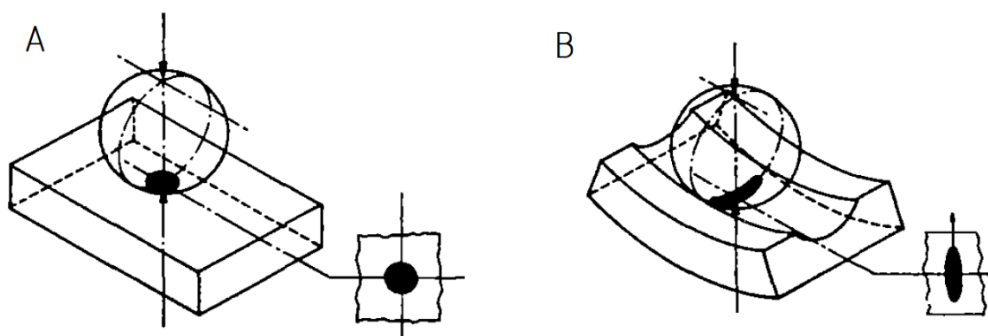
#### 2.1.1 Konstrukce valivých ložisek

Valivá ložiska jsou konstruována tak, aby přenášela silová zatížení v určitých směrech. Mezi dva hlavní typy ložisek dle směru zatěžování patří ložisko axiální a radiální. Konstrukce je většinou tvořena dvěma kroužky, mezi kterými se odvaluje několik elementů. Vzájemné fixní polohy elementů zajišťuje ložisková klec. Kontaktní povrchy u axiálních a radiálních valivých ložisek jsou nekonformně zakřivené (viz Obr. 2-1 vpravo).



Obr. 2-1 Konformně (vlevo) a nekonformně (vpravo) zakřivené třecí povrchy [32]

Pro simulování kontaktních ploch v ložisku je často používán tribometr *ball-on-disk*, kde kontakt tvoří disk a kulička, styková ploška zde nabývá kruhového tvaru (viz Obr. 2-2 A). Avšak u axiálních či radiálních kuličkových ložisek je styková oblast eliptická (viz Obr. 2-2 B). Tento tvar je způsoben zakřivením ložiskových kroužků. Hlavní poloosa eliptické kontaktní oblasti u radiálního ložiska je rovnoběžná s osou rotace ložiska, na rozdíl od axiálního ložiska, kde je hlavní poloosa eliptického kontaktu na osu rotace ložiska kolmá a protíná ji.



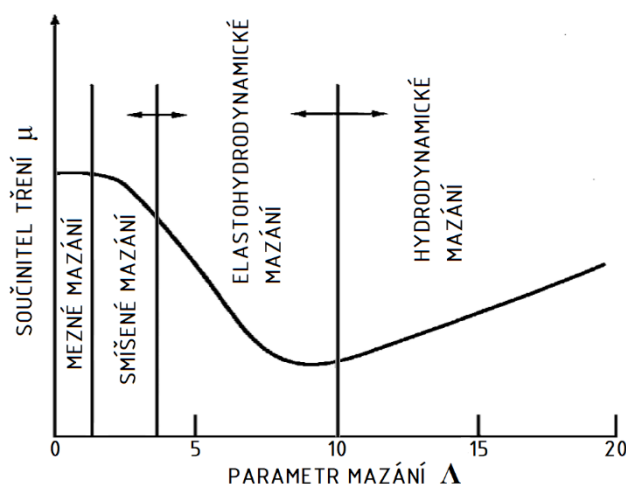
Obr. 2-2 EHD kontaktní oblasti A) *ball-on-disk* a B) radiálního ložiska [32]

## 2.1.2 Mazání valivých ložisek

Mazání je proces, při kterém vniká mazivo mezi vzájemně pohybující se kontaktní plochy, kde významně redukuje tření a opotřebení těchto ploch. Dle interakce třecích povrchů rozeznáváme tři základní druhy mazání, a to mazání mezní, smíšené a kapalinové. Kapalinové mazání lze dále rozdělit na mazání elastohydrodynamické a hydrodynamické.

Při mezním mazání dochází k přímému kontaktu nerovností třecích povrchů. S nárůstem tloušťky mazacího filmu vzniká smíšené mazání, povrchové výstupky nerovností se stále dotýkají, avšak v menší míře. S dalším nárůstem tloušťky maziva lze docílit hydrodynamického mazání, které je základním principem mazání kluzných ložisek. Elastohydrodynamické mazání nastává převážně ve styku nekonformně zakřivených povrchů. Typickým zastoupením je mazání valivých ložisek.

Zmíněné rozdělení režimů mazání se Stribeckovou křivkou je možné vidět na Obr. 2-3.



Obr. 2-3 Stribeckova křivka, parametr mazání [30]

Stribeckova křivka udává závislost mezi součinitelem tření a parametrem mazání  $\Lambda$ , který je dán rovnicí:

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_q^2 + R_q^2}}, [-] \quad (1)$$

kde  $h_{min}$  je minimální tloušťka mazacího filmu v  $\mu\text{m}$  a  $R_q$  je průměrná kvadratická úchylka posuzovaného povrchů v  $\mu\text{m}$ .

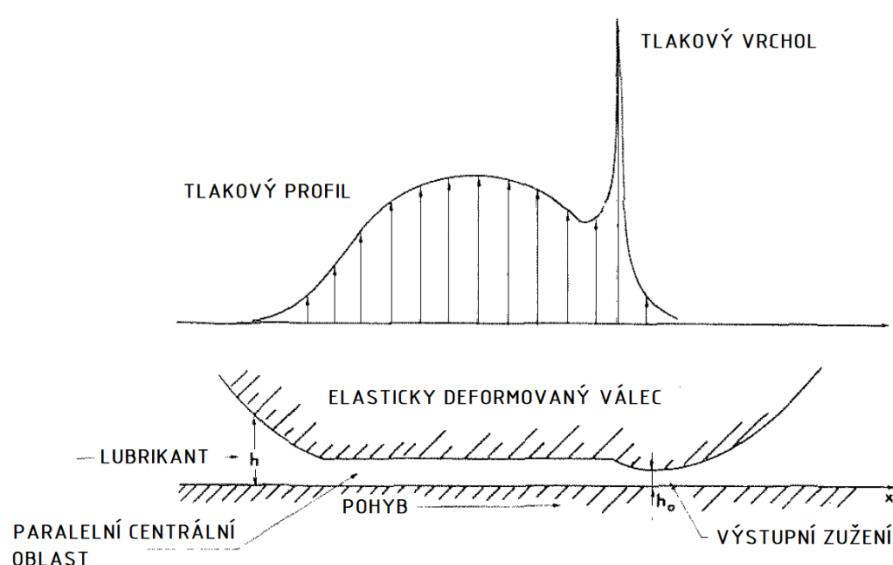
Typické rozmezí tlouštěk mazacího filmu a parametru mazání pro:

- Hydrodynamické mazání	1–100 $\mu\text{m}$	$5 < \Lambda < 100$
- Elastohydrodynamické mazání	0,01–10 $\mu\text{m}$	$3 < \Lambda < 10$
- Smíšené mazání	0,01–1 $\mu\text{m}$	$1 < \Lambda < 5$
- Mezní mazání	0,005–0,1 $\mu\text{m}$	$\Lambda < 1$

## Elastohydrodynamické mazání

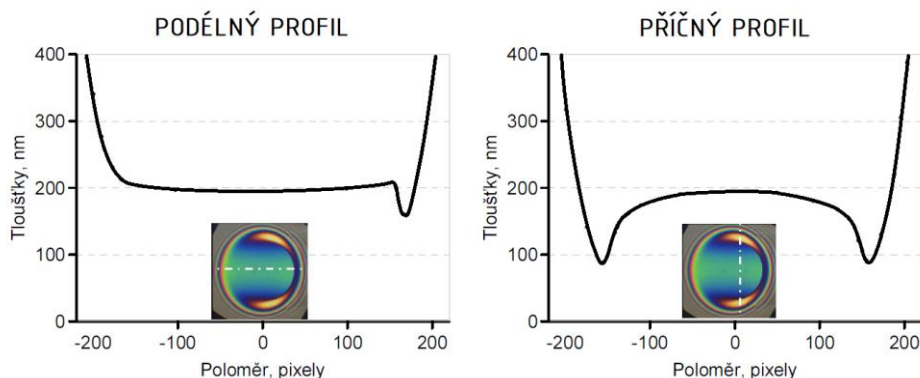
Na stykové plošce nekonformně zakřivených povrchů dochází k poměrně vysokému kontaktnímu tlaku. Viskozita kapalných maziv se s narůstajícím tlakem exponenciálně zvyšuje. Kvůli zvýšené viskozitě maziva a elasticitě povrchu se v kontaktu nachází více maziva, než by odpovídalo hydrodynamickému mazání v kluzném ložisku. [34].

Jedna z hlavních odlišností tlakového profilu EHD kontaktu od Hertzova spočívá ve znatelném tlakovém vrcholu (viz Obr. 2-4), který je charakteristický pro látky (maziva) a podmínky, za kterých je výrazná (exponenciální) změna viskozity s tlakem. Samotná konstrikce je viditelná někdy i bez tlakové špičky. Další odlišností od Hertzova kontaktu je odchylka tlaku na vstupu do kontaktu. Je zde kontinuální změna tlaku umožňující vtahování maziva do kontaktu.



Obr. 2-4 Elastohydrodynamický kontakt [31]

Skutečný profil tloušťky mazacího filmu lze pozorovat na zařízení *ball-on-disk* pomocí kolorimetrické interferometrie na Obr. 2-5, kde lze vidět konstrikci v tloušťce, jež je spojena s lokální změnou deformace, která musí být doprovázena tlakovou špičkou.

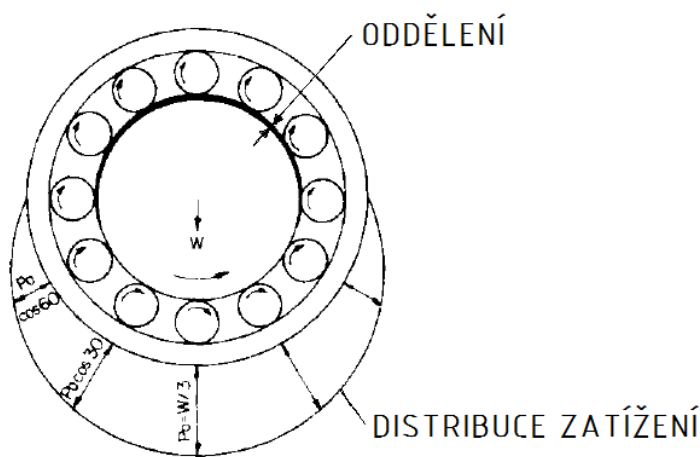


Obr. 2-5 Elastohydrodynamický kontakt na kolorimetrické interferometrii [35]



## Vliv směru zatěžování na tloušťku olejového filmu v kontaktech

Pokud se vnitřní kroužek radiálního ložiska zatíží silou kolmo na jeho osu rotace, je silové zatížení rozděleno na valivé elementy v oblasti jedné poloviny ložiska (viz Obr. 2-6). Největší zatížení je přeneseno přes elementy ve středu zatěžované oblasti [1], díky tomu je zde v kontaktech nejtenčí tloušťka filmu. Naopak v nezatížené oblasti se kvůli odstředivé síle valivé elementy oddělují od vnitřního prstence a odpovídajícím způsobem se poté zvětšuje tloušťka filmu v kontaktech. U axiálního ložiska se silové zatížení rozděluje na valivé elementy rovnoměrně, kvůli tomu by měla být tloušťka olejového filmu ve všech kontaktech stejná. Při vyšších rychlostech působí na elementy také odstředivá síla, která unáší mazivo od středu otáčení ložiska.



Obr. 2-6 Distribuce zatížení v ložisku [1]

## Predikce tloušťky mazacího filmu

Pro predikci tloušťky mazacího filmu v EHD kontaktu se často používají analytické vztahy. Ve studiích týkajících se elektrických metod měření mazacího filmu Jablonka a kol. [6], [4], [2], [19] se používají ověřené rovnice definované prací Hamrock a Dawson [37] pro zjištění minimální tloušťky filmu  $H_{min}$  a tloušťky ve středu kontaktu  $H_c$ .

Rovnice jsou vytvořeny proložení výsledku numerických simulací podmínek popsanych bezrozměrnými parametry  $G$ ,  $U$ ,  $W$  za předpokladu izotermických podmínek a newtonovského chování maziva. Rovnice jsou:

$$H_{min} = 3,63 \cdot U^{0,68} \cdot G^{0,49} \cdot W^{-0,073} \cdot (1 - e^{-0,68 \cdot k}), [m] \quad (2)$$

$$H_c = 2,69 \cdot U^{0,67} \cdot G^{0,53} \cdot W^{-0,067} \cdot (1 - 0,61 \cdot e^{-0,73 \cdot k}), [m] \quad (3)$$

kde  $H_{min}$  je minimální tloušťka mazacího filmu v m,  $H_c$  je centrální tloušťka mazacího filmu v m,  $U$  je bezrozměrný rychlostní parametr,  $G$  je bezrozměrný materiálový parametr,  $W$  je bezrozměrný zatěžující parametr,  $k$  je bezrozměrný parametr elipticity.

Bezrozměrné parametry  $U$ ,  $G$ ,  $W$ ,  $k$  vyskytující se v rovnicích pro minimální a střední tloušťku mazacího filmu jsou definovány:

$$U = u \cdot \eta / E' \cdot R' \quad (4)$$

$$G = \alpha \cdot E' \quad (5)$$

$$W = F / E' \cdot R'^2 \quad (6)$$

$$k = 1,0339 \cdot (R_y / R_x)^{2/\pi} \quad (7)$$

kde  $u$  je relativní rychlost valení v m/s,  $\eta$  je dynamická viskozita v (N·s)/m<sup>2</sup>,  $E'$  je efektivní Youngův modul v Pa,  $R'$  je redukovaný poloměr v m,  $\alpha$  je koeficient maziva v 1/Pa,  $F$  je silové zatížení v N,  $R_y$  je redukovaný poloměr ve směru osy  $y$  v m,  $R_x$  je redukovaný poloměr ve směru osy  $x$  v m.

V rovnicích pro bezrozměrné parametry se vyskytují redukované veličiny  $E'$  a  $R'$ , které jsou dány:

$$E' = 2 / \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right), [Pa] \quad (8)$$

$$R' = 1 / \left( \frac{1}{R_y} + \frac{1}{R_x} \right), [m] \quad (9)$$

kde  $\mu$  je Poissonovo číslo,  $E$  je Youngův modul v Pa.

## 2.2 Základní druhy poškození ložisek

Poškození valivých ložisek jsou většinou spojována s únavovou životností, ale ta je často zkrácena kvůli nevhodnému či nedostatečnému mazání. Nejčastější příčiny poruchy spojené s mazáním jsou:

- nevhodné mazivo
- znečištěné mazivo
- opotřebované mazivo
- nedostatek maziva
- přebytek maziva

Kvůli nevhodnému či nedostatečnému mazání může dojít k poškození ložiska hned několika způsoby. Mezi ty hlavní patří únava materiálu či opotřebení [62]. Vybraná poškození ložiska jsou popsána v následujících odstavcích.

### Únavové porušení

Při tomto poškození dochází k odlupování různé části oběžné dráhy ložiskového kroužku, přičemž odlupování je důsledkem únavového namáhání [62]. Za chodu ložiska dochází k tvorbě prvotních trhlin, které se nachází v tenké povrchové vrstvě materiálu [60]. Trhliny se rozvíjí až do doby než nastane vydrolování částí povrchu, z čehož významné důlky s lasturovým lomem se označují jako *pitting* [60]. K předčasnému odlupování vzhledem k životnosti ložiska může dojít kvůli malé tloušťce maziva, velkému hladovění, nebo je to chemický vliv maziva na proces únavy.

### Opotřebení

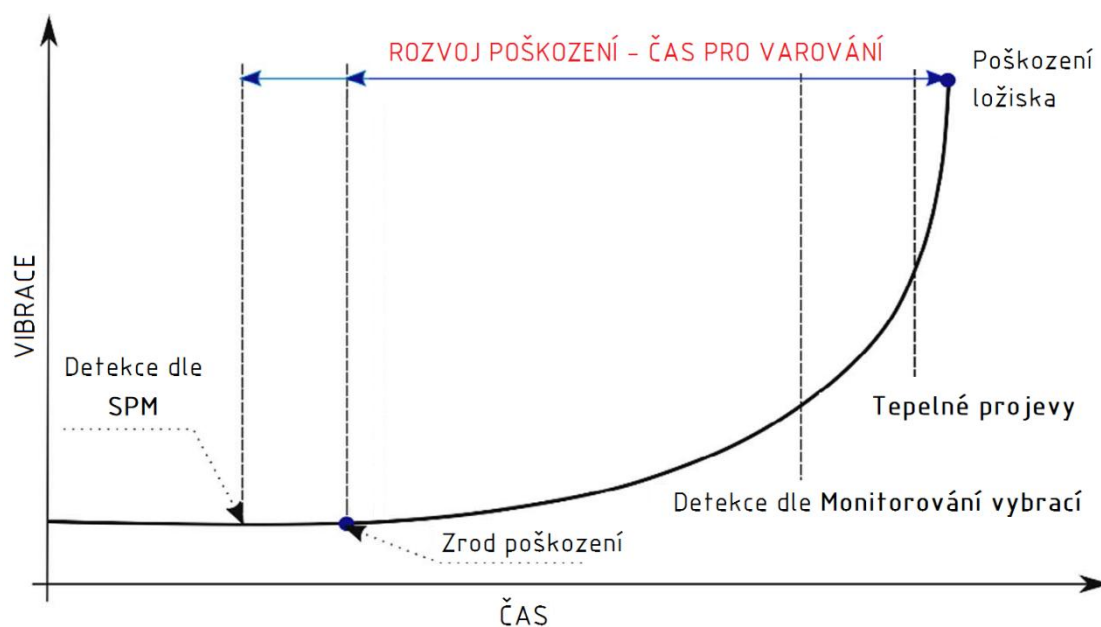
Opotřebení může vzniknout vlivem třecích těles (kontaminantů) nebo přímým stykem kontaktních ploch. V případě kontaminantů mohou mezi funkčními plochami ložiska vniknout částice, které mají za následek rychlé abrazivní opotřebení ložiska [60]. Částice se do ložiska mohou dostávat z prostředí, nebo mohou být obsažené v mazivu. V případě přímého dotyku kontaktních ploch dochází k zhoršeným podmínkám pro udržení mazacího filmu, které může vést k nadměrnému opotřebení [62]. Jedná se o poškození často způsobené malou tloušťkou maziva, hladověním nebo znečištěním maziva. [61].

## 2.3 Klasické způsoby sledování provozního stavu ložiska

Stav mazání a samotného ložiska se většinou vyhodnocuje na základě veličin z několika monitorovacích metod. Sledování je prováděno buď nepřetržitě, nebo po určitých časových intervalech. Základní monitorovací metody jsou:

- monitorování dle teploty
- monitorování dle vibrací
- monitorování dle akustických emisí

Zmíněné metody lze zařadit do dvou skupin. Metody zaměřené na zhoršené podmínky chodu ložiska, kde je detekováno poškození. A metody, které jsou zaměřeny na sledování stavu mazání, jenž může vést k poškození. Jednotlivé metody dle času, v jakém jsou schopny zareagovat na zhoršený stav, lze vidět na Obr. 2-7.



Obr. 2-7 Vibrace ložiska za čas [39]

### Monitorování teploty

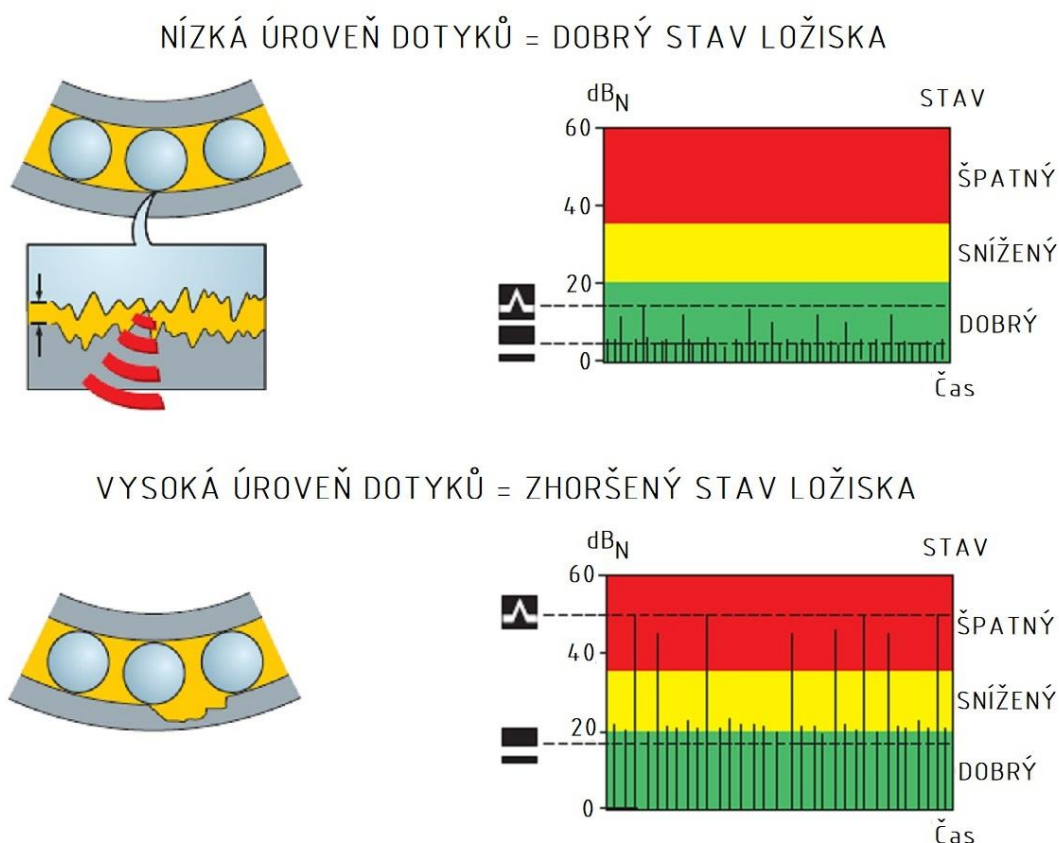
Pokud se náhle výrazně zvýší teplota ložiska, je jen otázkou několika hodin či dokonce jen minut než dojde k jeho destrukci [43]. Nárůst teploty tedy signalizuje stav pro okamžitou úpravu optimálních parametrů chodu ložiska nebo jeho výměnu.

## Monitorování vibrací

Metoda je založena na měření vibrací ložiska. Pokud se při chodu ložiska na dráze jeho elementů nachází defekt, valením elementů přes něj se vytvoří rázy, které rozvibrují celé ložisko [42]. Vibrace ložiska se vyhodnocují frekvenční analýzou, či se pouze zaznamenává jejich velikost. Tyto hodnoty mohou odhalit defekt, který značí blízký konec životnosti ložiska.

## Monitorování dle akustických emisí

Na zpracování ultrazvukového signálu při chodu ložiska je založeno několik metod. Mezi jednu z nejpoužívanější patří metoda SPM (Shock Pulse Method) [59]. Metoda je zaměřena na snímání rázových pulzů, které jsou vybuzené dotykem výstupků kontaktních ploch ložiska. Snímač umístěný v uložení ložiska je nastaven v rozmezí rezonanční frekvence 25 až 35 kHz. Nižší frekvence jsou odfiltrovány. Ultrazvukové rázové pulzy jsou zaznamenány snímačem a převedeny pomocí elektrického obvodu na hodnotu v decibelech. Z chodu určitého ložiska lze získat jeho závislost mezi ultrazvukovými pulzy v decibelech a kvalitou mazání či jeho stavem, což je využito pro vyhodnocování (viz Obr. 2-8).



Obr. 2-8 Princip metody SPM (Shock Pulse Method) [59]

## 2.4 Metody pro hodnocení stavu mazání

Kromě klasických monitorovacích metod existují také metody, které v běžné praxi nejsou zcela rozšířené, ale skýtají potenciál pro monitorování mazacího filmu ložisek. Následující kapitola se věnuje několika vybraným metodám. U každé z nich je popsán její princip, měřicí řetězec, zařízení na jejich testování a výsledky.

### 2.4.1 Měření dle odporu

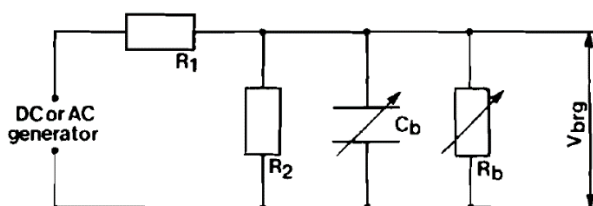
#### Princip měření

V mazaném kontaktu odvalujících se těles se dají rozeznávat dva základní stavy. Stav, kdy dojde k dotyku výstupků kontaktních ploch, a stav, kdy jsou kontaktní plochy zcela separované olejovým filmem. Pokud se měří odpor v mazaném kontaktu, lze pomocí něj oba stavy rozlišit. Stav, kdy dojde k dotyku kontaktních ploch, se projeví minimálním odporem kontaktu ( $<10\ \Omega$ ). Naopak stav, kdy dojde k oddělení ploch, se projeví maximálním odporem kontaktu ( $>100\ \text{M}\ \Omega$ ). Jednotlivé stavy se během odvalování neustále střídají s různou četností. Obecně je však možné říci, že s narůstajícím parametrem mazání klesá četnost dotyků výstupků kontaktních ploch. Pokud se vypočítá průměrná hodnota odporu za určitý časový interval, vypovídá tato hodnota o četnosti dotyků kontaktních ploch a lze s její pomocí získat informaci o režimu mazání [18].

#### Měřicí řetězec

Pro měření využívá studie Hansen a kol. [18] potenciometrický modul SCM5B36-03 (viz Obr. 2-10) na tribometru typu *ball-on-disk*. Modul posílá skrz kontakt kuličky a disku proud a měří výsledné napětí. To se pak přepočítá na odpor. Vzorovací frekvence ukládaných dat je 1 kHz ( $T=0,001\ \text{s}$ ). Data jsou průměrována s frekvencí 4 Hz ( $T=0,25\ \text{s}$ ). Výsledná hodnota průměrného odporu kontaktu vypovídá o množství dotyků v kontaktu.

Ve studii [55] je použit obvod viz Obr. 2-9. Jedná se o odporový dělič s odpory označenými jako  $R_1$  a  $R_2$ . Ložisko je zde popsáno pomocí kondenzátoru označeného jako  $C_b$  a pomocí rezistoru označeného jako  $R_b$ . V obvodu je zapojen generátor se stejnosměrným či střídavým napětím. Pomocí napětí  $V_{brg}$  je analyzován odpor kontaktu. Odpor kontaktu, stejně jako ve studii [18], popisuje množství dotyků výstupků.

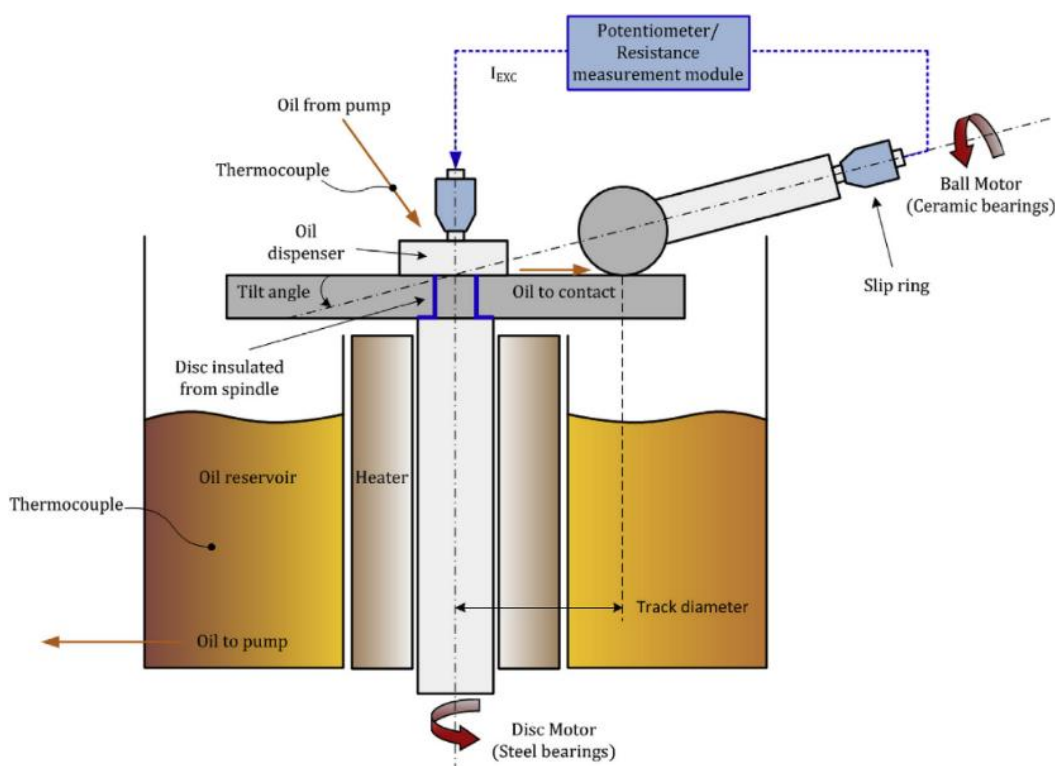


Obr. 2-9 Elektrický obvod na základě odporového děliče [55]

## Zařízení pro testování

Ve studii Xie a kol. [12], Magdun a Binder [27] a Heemskerk a kol. [55] je pro testování měřicího řetězce použito zařízení s dvojicí valivých ložisek umístěných na společné hřídeli. Využití valivých ložisek pro potřeby testování měřicího obvodu je vhodné pro simulování reálného užití, avšak v ložisku dochází k několika kontaktům zároveň, a proto tloušťka mazacího filmu může být na každém kontaktu odlišná.

Studie [18] používá pro potřeby testování zjednodušený model kontaktu a tím je tribometr *ball-on-disk* (viz Obr. 2-10). Na tribometru se nachází pouze jeden kontakt mezi diskem a kuličkou a lze na něm přesně definovat valivou rychlost či změřit koeficient tření.



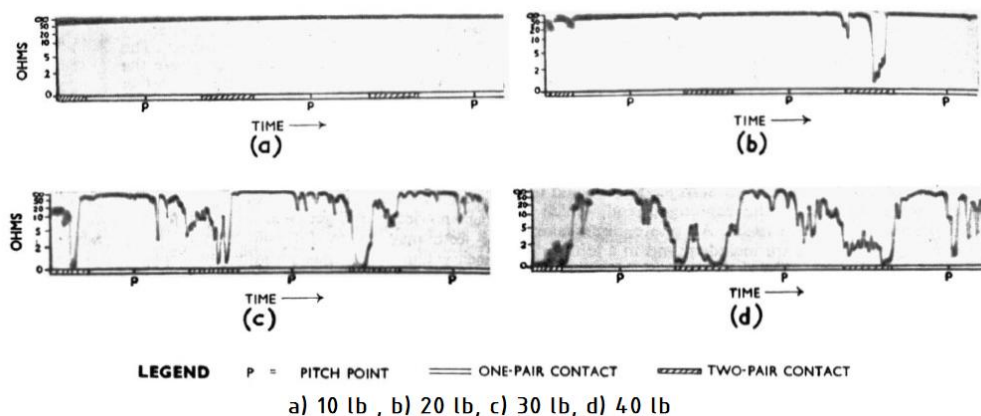
Obr. 2-10 Zapojení měřicího obvodu na tribometru ball-on-disk [18]

Pro zapojení elektrického obvodu na tribometr je nutná jeho konstrukční úprava. Disk a kulička musí být odizolovány od kostry zařízení, aby elektrický proud tekł pouze přes mazaný kontakt. Jelikož disk i kulička konají rotační pohyb, je nutné pro propojení elektrického obvodu použít rotační konektory (Slip ring) [18].

U testovacích zařízení, kde je použito valivé ložisko, je také nutná konstrukční úprava. Uložení ložiska musí být odizolováno tak, aby elektrický proud tekł jen přes kontakty v ložisku. Pokud má ložisko kovovou klec která fixuje pozici valivých elementů, musí být nahrazena klecí z nevodivého materiálu [1], [9].

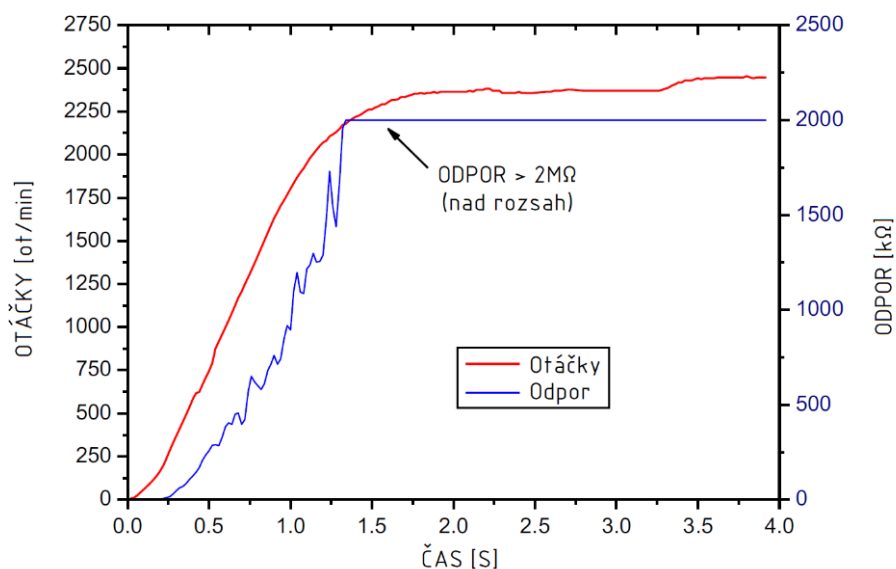
## Výsledky

Ve studii Lane a Hughes [45], kde byl měřen odpor na dvojici ozubených kol, byly úspěšně zaznamenány kovové dotyky. Na Obr. 2-11 lze pozorovat, že s narůstajícím zatížením, a tedy se snižující se tloušťkou mazacího filmu, narůstá četnost dotyků kontaktních ploch.



Obr. 2-11 Kontaktní odpor pro čtyři zatížení zaznamenané krátce po rozjezdu [45]

Studie LIU a kol. [46] a pak také studie jiných autorů [18],[12] prokazují využitelnost metody měření odporu kontaktu za určitý časový interval, který vypovídá o dotycích výstupků v kontaktní oblasti. Na Obr. 2-12 lze pozorovat že, pokud se zvětšuje odpor, klesá četnost dotyků a roste tloušťka olejového filmu.



Obr. 2-12 Odpor kontaktu v závislosti na otáčkách ložiska [12]

Použitelnost metody měření je však dle studie [55] rozdělena parametrem mazání  $\lambda$  o hodnotě  $\sim 4$ . Pokud je  $\lambda$  menší jak  $\sim 4$  lze provést měření, avšak pokud je  $\lambda$  větší jak  $\sim 4$ , jsou již povrchy plně separované a nelze měřit četnost dotyků, neboť k nim dochází již minimálně a na výsledném průměrném odporu se již neprojeví.



## 2.4.2 Měření dle kapacity

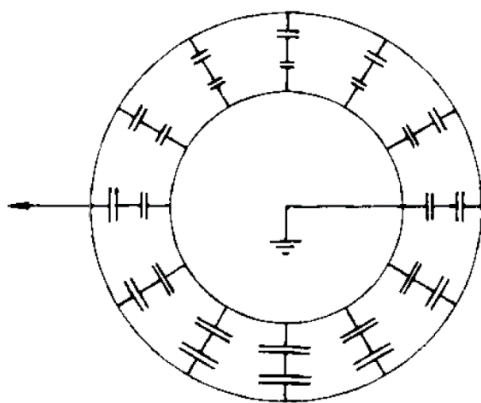
### Princip měření

Měření je založeno na připodobnění valivého ložiska ke kondenzátoru. Základní rovnice pro výpočet elektrické kapacity deskového kondenzátoru je:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A/d, [\text{F}] \quad (10)$$

kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua v F/m,  $\varepsilon_r$  je permitivita dielektrika v F/m,  $A$  je obsah dvou paralelních ploch v  $\text{m}^2$  a  $d$  je vzdálenost mezi nimi v m.

Z uvedené rovnice se dá pozorovat závislost mezi vzdáleností desek a kapacitou kondenzátoru. Pokud se vzdálenost mezi deskami kondenzátoru snižuje, roste jeho kapacita. Tento princip lze uplatnit u ložiska, kde pomocí kapacity je možné zjistit tloušťku mazacího filmu. Tloušťku mazacího filmu lze poté přepočítat na režim mazání ložiska.

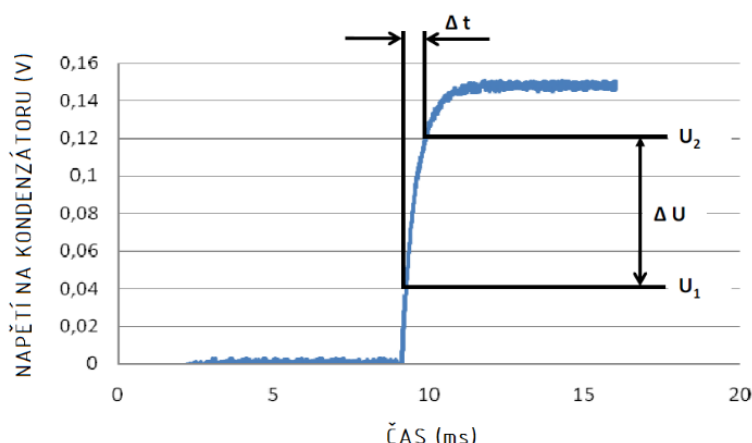


Obr. 2-13 Schéma kapacit radiálního valivého ložiska [1]

Celková kapacita radiálního ložiska se skládá z jednotlivých kapacit na kontaktech vnějšího a vnitřního kroužku ložiska (viz Obr. 2-13). Jelikož tloušťky olejových filmů v jednotlivých kontaktech jsou odlišné dle jeho zatížení (viz Obr. 2-6), kapacita jednotlivých kontaktů se od sebe liší. Aby bylo možné zjistit tloušťku maziva pouze na dvou kontaktech jednoho valivého elementu, jsou ve studii Jablonka a kol. [16] všechny valivé elementy kromě jednoho nahrazeny elementy z nevodivého materiálu.

Samotné určení kapacity je založeno na dvou základních principech. První princip spočívá v monitorování nabíjecí charakteristiky kondenzátoru. Druhý se soustředí na měření impedance.

Monitorování nabíjecí charakteristiky využívají studie Wittek a kol. [4], Magdun a Binder [27] a Furtmann a kol. [11]. První dvě studie, [4] a [27], ho používají pro zjištění kapacity u valivého ložiska. Studie [11] ho využívá pro zjištění kapacity u ozubených převodů. Kontakt je zapojen do elektrického obvodu jako kondenzátor. Následně je do obvodu přiveden napěťový skok přes definovaný nabíjecí odpor  $R_L$ . Průběh nabití ložisek či ozubených kol ukazuje nabíjecí charakteristika (viz Obr. 2-14).



Obr. 2-14 Nabíjecí charakteristika [4]

Kapacitu lze následně pomocí nabíjecí charakteristiky vypočítat ze vzorců:

$$C = \tau / R_L, [\text{F}] \quad (11)$$

$$\tau = \Delta t / \ln(U_2 / U_1), [\text{F} \cdot \Omega] \quad (12)$$

kde  $\tau$  je nabíjecí konstanta v  $\text{F} \cdot \Omega$ ,  $R_L$  je definovaný odpor v  $\Omega$ ,  $\Delta t$  je časový usek nabíjení v s definovaný mezi napětími  $U_1$  a  $U_2$  ve V.

Pomocí impedance je zjištěna kapacita kontaktu ve studiích Xie a kol. [12], Zhang a kol. [9] a Jablonka a kol. [6], [25], [16], z nichž studie [9], [16], [12] určují kapacitu na valivých ložiscích a studie [6], [25] na tribometru *ball-on-disk*. Kontakt je zapojen do elektrického obvodu se zdrojem harmonického střídavého napětí. Velikost kapacity lze určit z rovnic:

$$C = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot X), [\text{F}] \quad (13)$$

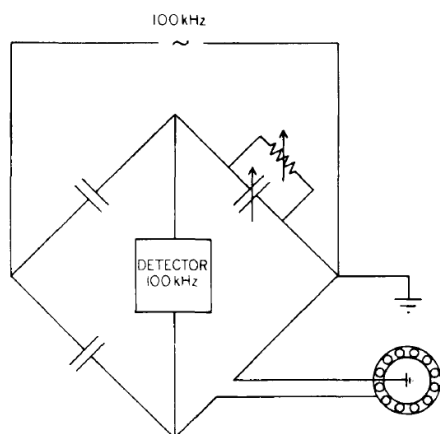
$$|X| = U_m / I_m, [\Omega] \quad (14)$$

kde  $C$  je kapacita ve F,  $f$  je frekvence v Hz,  $X$  je reaktance v  $\Omega$ ,  $U_m$  je amplituda napětí na kondenzátoru ve V,  $I_m$  je amplituda proudu na kondenzátoru v A.

## Měřicí řetězec

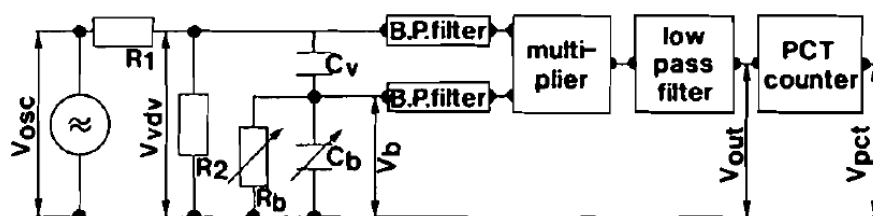
Studie [6], [9], [25] používají pro měření impedance specializovaný analyzátor impedance *Solartron 1260*, který je schopen měřit s frekvencí řádově od 0,1 Hz do 1 MHz.

Studie [1] využívá pro měření můstkové zapojení kondenzátorů (viz Obr. 2-15). Zdroj střídavého proudu (AC) má frekvenci 100 kHz. Detektor pracuje na totožné frekvenci. Na detektor je napojen osciloskop, z kterého se vyčísluje kapacita kontaktu.



Obr. 2-15 Měření pomocí můstkového zapojení [1]

Ve studiích Cen a kol. [56], [57], studii Jablonka a kol. [16] a studii Wikström a Jacobson [58] je pro měření použito zařízení vyvinuto ve studii Heemskerk a kol. [55] označované jako „SKF Lubcheck“ (viz Obr. 2-16).



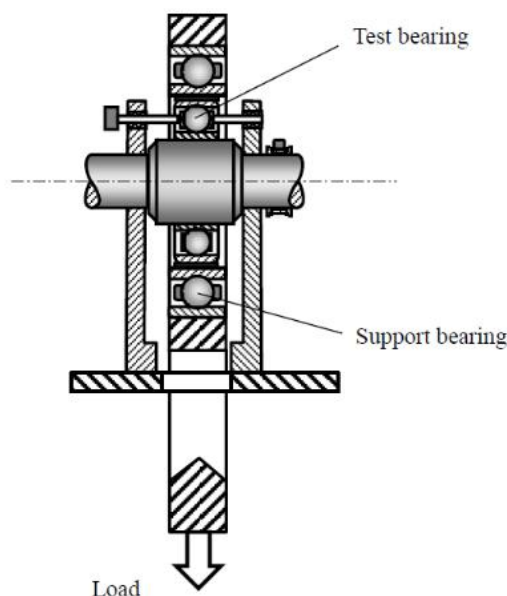
Obr. 2-16 SKF Lubcheck [55]

Základ obvodu „SKF Lubcheck“ tvoří odporový dělič spolu s kapacitním děličem. Odporový dělič se skládá z rezistorů označených jako  $R_1$  a  $R_2$ . Kapacitní dělič je tvořen kondenzátorem  $C_v$  a kondenzátorem  $C_b$ . Kondenzátor  $C_b$  spolu s rezistorem  $R_b$  symbolizuje testované ložisko. Dalšími částmi obvodu jsou band-pass filtry (pásmové propusti), kterými prochází pouze požadovaná frekvenční oblast, multiplier (multiplikátor), kterým je demodulováno napětí z obou kondenzátorů, filtr typu dolní propust' k odfiltrování vysokých frekvencí a nakonec PCT Counter (čítač) označující zařízení sčítající časový zlomek kovového kontaktu.

## Zařízení pro testování

Ve studiích Wilson a kol. [1], Magdun a kol. [27], Xie a kol. [12] a Wittek a kol. [4] jsou použita dvě radiální valivá ložiska na společné hřídeli. Ložiska jsou ve studiích [1], [27], [12] zatěžována radiální silou, a ve studii [4] zase axiální silou. Testování na valivých ložiscích se přibližuje reálnému užití, avšak v ložisku dochází k několika kontaktům zároveň a tloušťka mazacího filmu může být dle zatížení na každém kontaktu odlišná.

Aby se v radiálním kuličkovém ložisku neměnila tloušťka mazacího filmu v jednotlivých kontaktech dle jejich aktuální polohy vůči zatížení, bylo ve studii Zhang a kol. [9] zkonstruováno zařízení, kde je ustálena poloha ložiskových kuliček vůči zatížení (viz Obr. 2-17). Fixace ložiskových kuliček je provedena pomocí osy na kuličce ve středu zatěžované oblasti ložiska. Aby byl umožněn valivý pohyb všech ložiskových kuliček, je testované ložisko vloženo do vnitřního kroužku většího podpůrného kuličkového ložiska.



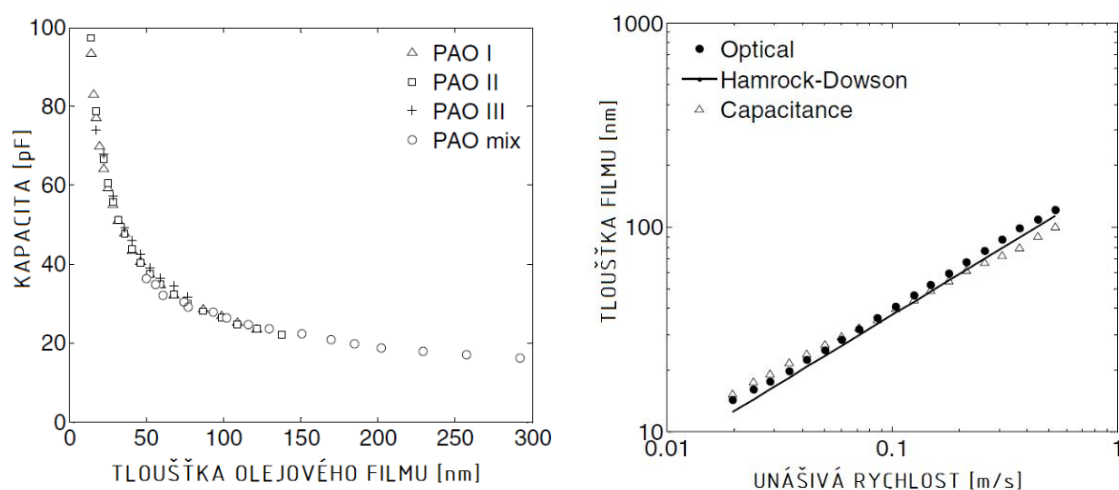
Obr. 2-17 Experimentální zařízení [9]

Stejně jako u odporové metody, tak i u kapacitní metody, je v některých studiích použit pro testování metody tribometr, který má pouze jeden mazaný kontakt. Ve studiích Jablonka a kol. [6], [25] je pro měření upraven tribometr typu *ball-on-disk*. V novější studii Jablonka a kol. [16] se nejprve provede ověření měřicího řetězce na tribometru *ball-on-disk* s optickou interferenční metodou v bílém světle, která udává ověřené tloušťky mazacího filmu, a až následně se měření přesune na testovací aparát s radiálním kuličkovým ložiskem. Studie Dyson a kol. [20] taktéž používá tribometr, avšak typu *twin disk*, kde se po sobě odvalují dva ocelové disky.

Aby bylo možné měřicí metodu použít pro ložisko, je nutné stejně jako u odporové metody nahradit kovové vodící a vymežující prvky ložiska (ložisková klec), které negativně ovlivňují svým kontaktem měření kapacity, za nevodivé. Také je nutné odizolovat vnější a vnitřní uložení ložiskového kroužku od ostatních částí zařízení [1], [9].

## Výsledky

Na Obr. 2-18 vlevo ze studie [6] lze pozorovat závislost mezi celkovou kapacitou kontaktu kuličky s diskem a tloušťkou olejového filmu na zařízení *ball-on-disk*. Obr. 2-18 vpravo ukazuje dobrou shodu měření pomocí optické interferometrie, měření pomocí impedance a analytickým výpočtem dle Hamrock-Dowson [37]. Dobrou shodu mezi teoretickou a změřenou tloušťkou lubrikantu v kontaktu nalezla také studie [4], kde byly také zaznamenány relativní permitivity vybraných maziv.



Obr. 2-18 Kapacita na tloušťce olejového filmu (vlevo), tloušťka olejového filmu dle různých metod [6]

Použitelnost měření je dle studie [4], [55] stejně jako u odporové metody rozdělena parametrem mazání  $\lambda$  o hodnotě  $\sim 4$ . Použitelnost měření dle kapacity je ale na rozdíl od měření dle odporu otočena. Pokud je  $\lambda$  větší jak  $\sim 4$ , dá se provést měření, avšak pokud je  $\lambda$  menší jak  $\sim 4$ , dochází k dotykům výstupků povrchu, které znemožňují měření kapacity. Ve studii [55] se snažili nahradit měření kapacity u hodnot  $\lambda$  menší jak  $\sim 4$  zakomponováním čítače doteků kontaktních ploch, který nahrazuje princip odporového měření.

### 2.4.3 Měření dle ultrazvuku

#### Princip měření

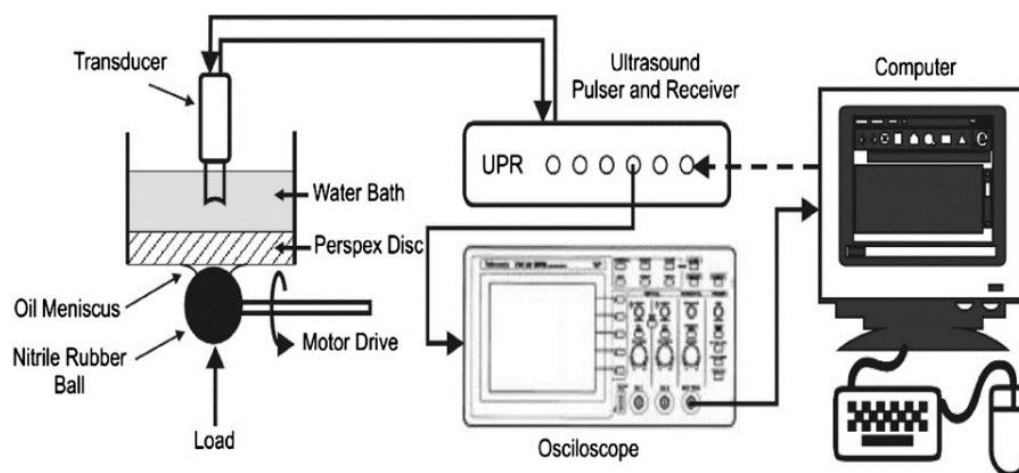
Do mezery mezi kuličkou a kroužkem je směřován skrz vnější kroužek ultrazvukový paprsek. Tento paprsek se poté odráží od vnitřních stěn v závislosti na parametrech olejového filmu. Snímač zachycuje odražené paprsky a dále je vyhodnocuje. Průběh odrazu vlny známý jako koeficient odrazu  $R$ , který lze připočítat na tloušťku mazacího filmu, je dán rovnicí:

$$R = z_1 \cdot z_2 / (z_1 + z_2), [-] \quad (15)$$

kde  $z_1$  a  $z_2$  jsou akustické impedance na obou stranách rozhraní v Pa·s/m.

#### Měřicí řetězec

Dle studií Ganshi a kol. [5] a Dwyer-Joyce a kol. [2] jsou generované napěťové pulzy vedeny do piezoelektrického senzoru ponořeného ve vodní lázni (viz Obr. 2-19). Tento objem vody nesmí být kontaminován vzduchovými bublinkami. V důsledku napěťových pulzů dosáhne senzor mechanické rezonance a vysílá ultrazvukové pulzy. Stejný senzor zaznamená odražený signál a pošle ho přes přijímač do osciloskopu, kde je vyhodnocen.

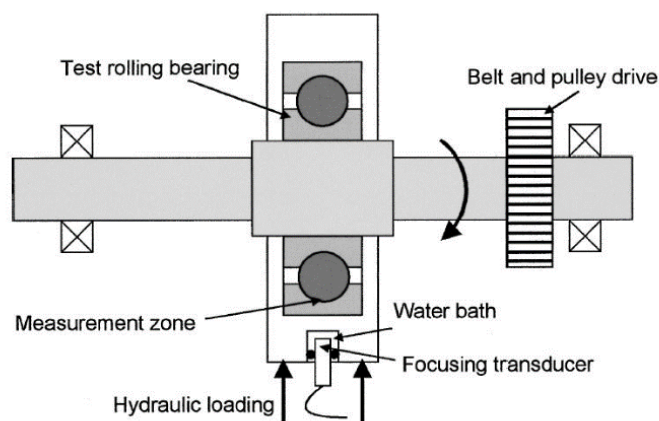


Obr. 2-19 Schéma zapojení ultrazvukového senzoru [5]

#### Zařízení pro testování

Studie [2] používá pro měření zařízení *ball-on-disk*. Na vrchní straně ocelového disku je vytvořena vodní lázeň, do které je ponořen piezoelektrický senzor. Z dolní strany disku je přitlačována rotující ocelová kulička. Studie [5] také používá zařízení *ball-on-disk*, avšak kulička je vyrobena z nitridové gumy kvůli vyšší elasticitě, která zajistí větší kontaktní plochu. Větší plocha má zaručit lepší měřitelnost při testování.

Ve studiích Ibrahim a kol. [7], Zhang a kol. [28] a Dwyer-Joyce a kol. [2] je použito zařízení pro testování reálných ložisek, které je složeno z hřídele, ložiskového pouzdra a radiálního kuličkového ložiska (viz Obr. 2-20). V ložiskovém pouzdře se nachází vodní lázeň, do níž je vložen piezoelektrický senzor pro vysílání a příjem ultrazvukových pulzů, který je zaměřen do středu kontaktní oblasti.

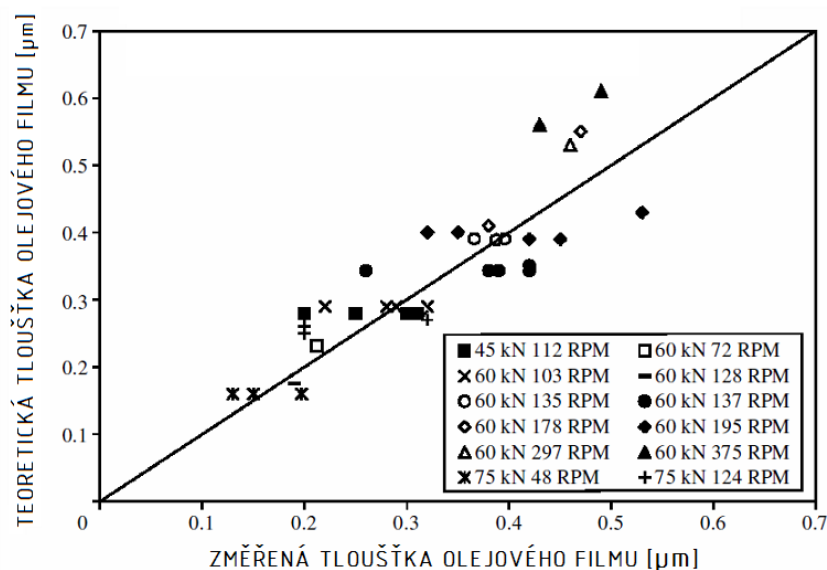


Obr. 2-20 Ultrazvukové testovací zařízení [2]

Pro účely měření není nutné upravovat konstrukci ložisek, neboť ultrazvukový pulz prochází pevnými tělesy, což je velká výhoda oproti ostatním monitorovacím metodám.

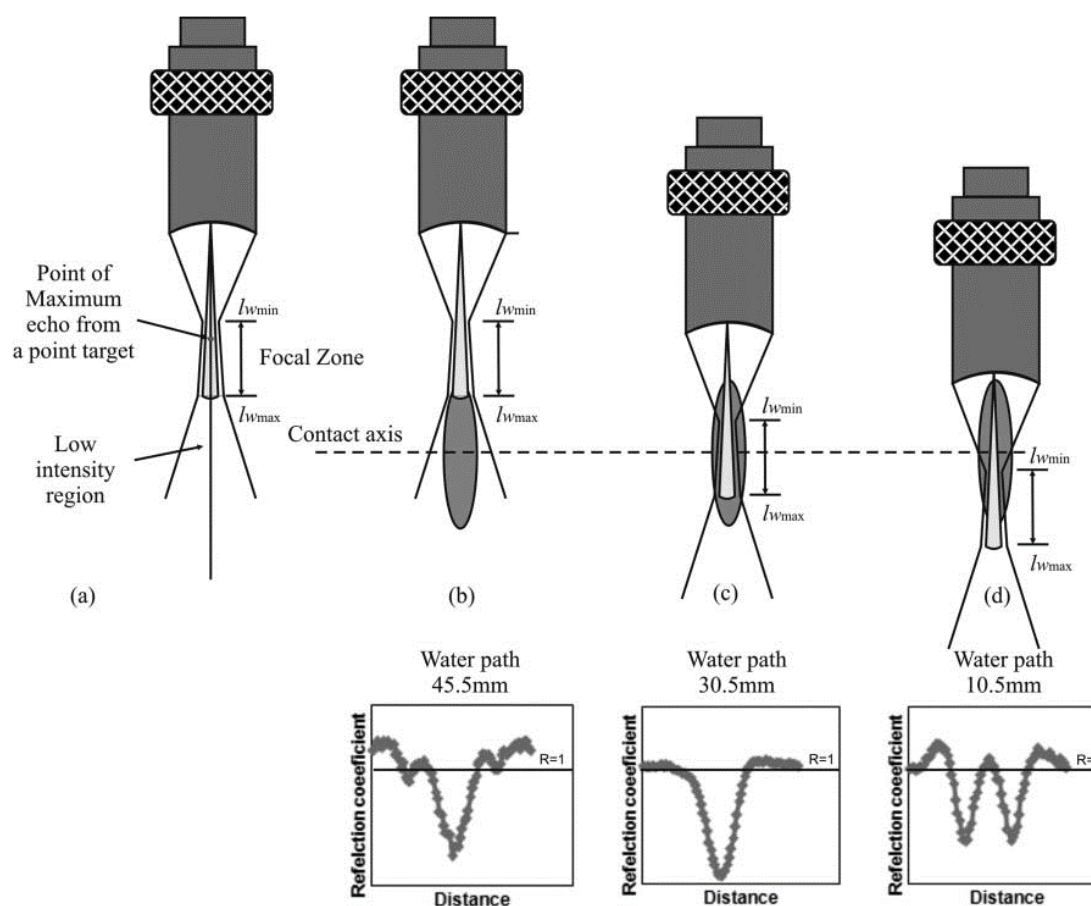
## Výsledky

Na Obr. 2-21 ze studie [11] je možné pozorovat srovnání teoretického výpočtu olejového filmu se změřením pomocí ultrazvukové metody. Na výsledcích z různě zatěžovaného ložiska a s různou rychlostí je viditelný značný rozptyl hodnot.



Obr. 2-21 Srovnání výsledků ultrazvukového měření tloušťky maziva v kontaktu [19]

Jeden z hlavních faktorů ovlivňující přesnost měření je dle studie [7] vzdálenost mezi piezoelektrickým senzorem (emitorem) a kontaktní oblastí. Pokud je ohnisko emitoru mimo určené meze (viz Obr. 2-22), získaný signál ztrácí na čitelnosti.



Obr. 2-22 Zaostření ultrazvukového paprsku [7]



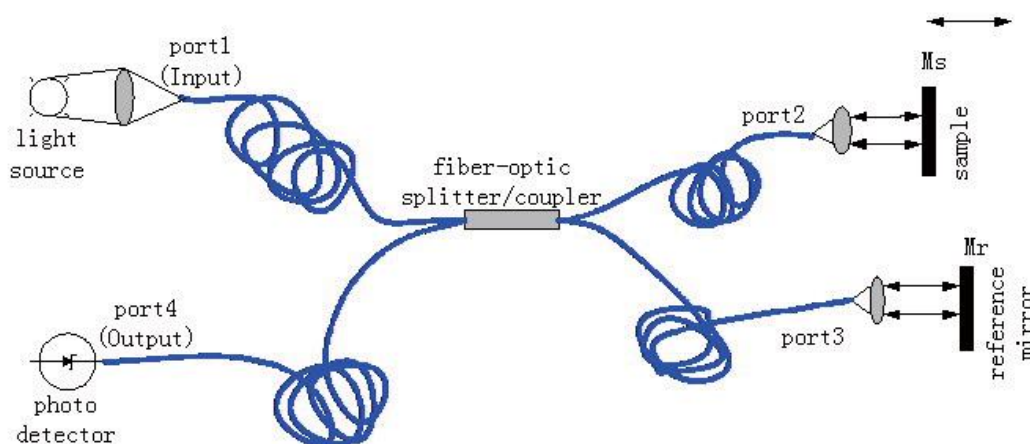
## 2.4.4 Měření pomocí optického interferometru s optickým vláknem

### Princip měření

Ze světelného zdroje je vyslán paprsek, který je posléze rozdělen na dva. Jeden z nich dopadne na přídavnou odrazovou plochu a druhý na plochu měřenou. Odrazy od obou paprsků jsou poté detekovány. Změna dráhy či indexu lomu prostředí vytvoří fázový rozdíl mezi paprsky, které vytvářejí interferenční obrazec, z kterého lze vyčíst vzdálenost mezi plochami.

### Měřicí řetězec

Ve studii Chen a kol. [3] prochází světelný paprsek ze zdroje skrz optické vlákno do rozdělovače paprsku, jeden svazek putuje do mezery kluzného ložiska a druhý do přídavného zrcadla. Oba navracené odrazy, jak od mezery ložiska, tak i odrazu od přídavného zrcadla, jsou poté vyhodnoceny fotodetektorem (viz Obr. 2-23).



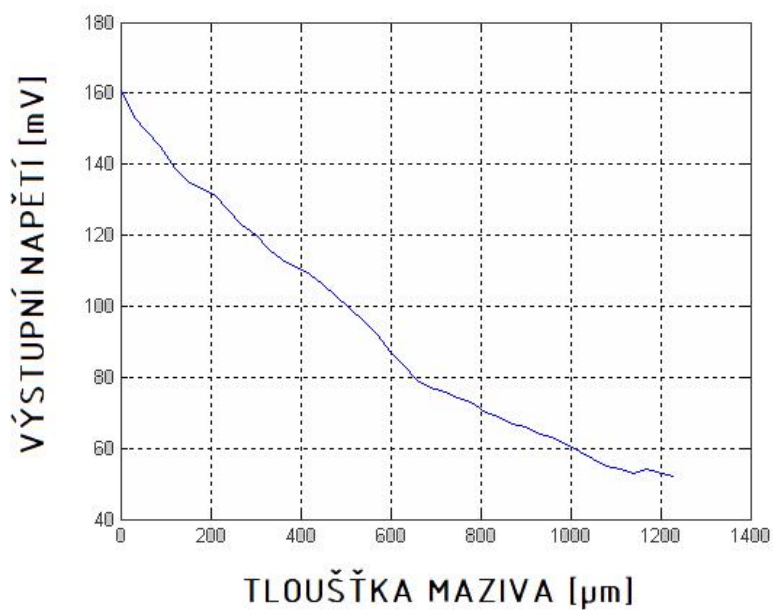
Obr. 2-23 Schéma optického interferometru s optickým vláknem [3]

### Zařízení pro testování

Studie [3] využívá optickou interferometrii k testování kluzného ložiska. Jeho vnější kroužek je opatřen otvorem, přes který je snímána mezera mezi vnitřním hřídelem a vnějším kroužkem. Pro použití kuličkového ložiska je nutná konstrukční úprava spočívající ve vyvrtání otvoru ve vnějším či vnitřním kroužku. Ten slouží pro vložení optického vlákna, avšak tento otvor může nepříznivě ovlivňovat samotný chod ložiska. Také je nutné počítat s tím, že chod ložiska může zanášet optické vlákno v ložisku a tím znemožňovat měření.

## Výsledky

V práci Zhang a kol. [47] naměřili pokles napětí na foto senzoru při nárůstu tloušťky maziva (viz. Obr. 2-24). Díky této závislosti se dá následně změřit tloušťka mazacího filmu.



Obr. 2-24 Napětí na foto senzoru vůči tloušťce mazacího filmu [47]

Dle studie [47] se rozlišení pohybuje v řadech 10 μm. Tato přesnost není pro účely použití na valivých ložiscích dostatečná.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Režim mazání v kuličkových ložiscích nelze v reálném čase jednoduše určit, často se režim mazání určuje pouze teoreticky pomocí predikce. Znalost režimu mazání u valivého ložiska v reálném čase je však důležitá, a to kvůli nastavení optimálního mazání. Tomu, jak zjistit režim mazání v reálném čase, se věnuje hned několik studií. Měřicí metody dle jejich principu lze rozdělit na elektrické, ultrazvukové a optické. Správně konstruovaný měřicí řetězec není snadné nastavit tak, aby mohl okamžitě měřit.

Každá z metod měří dle svého principu veličinu, která je závislá na tloušťce mazacího filmu nebo na režimu mazání. Danou závislost je nejprve nutné definovat pomocí souborů dat z měření. Tato data jsou proložena určitou funkcí. Vhodně zvolený princip zásadně ovlivňuje úspěšnost proložení dat, dle kterého bude režim mazání změřen.

Implementace měřicí metody na valivé ložisko vyžaduje konstrukční úpravy jeho uložení, nebo i konstrukční zásah do samotného testovaného ložiska. Z toho každá měřicí metoda má jiné konstrukční požadavky, které jsou více či méně invazivní.

### 3.2 Analýza a zhodnocení řešerše

#### Odporová metoda

Hlavní výhodou je to, že metoda nepotřebuje vizuální přístup do kontaktu. Je však vyžadována izolace ložiska, zapojení elektrického obvodu k rotující části vnitřního kroužku a konstrukční úprava ložiska. Aktuální hodnota odporu kontaktu vypovídá o množství interakcí výstupků v kontaktních oblastech. Hodnota odporu se střídá mezi minimem ( $<1\text{m}\Omega$ ), kdy dochází k dotykům výstupků kontaktních ploch, a maximem ( $>10\text{M}\Omega$ ) [45], kde jsou kontaktní plochy zcela oddělené. Pokud se vytvoří průměrná hodnota odporu kontaktu za určitý časový interval, má tato veličina vypovídající charakter o způsobu mazání [46], [55]. Avšak daná metoda je vhodná pouze tehdy, když je parametr mazání  $\lambda$  menší jak  $\sim 4$  [55]. Pokud hodnota parametru mazání nabývá většího čísla, povrchy jsou plně separované, ke kontaktům nedochází a nelze tedy provádět měření.

## Kapacitní metoda

Stejně jako odporová metoda, tak ani kapacitní metoda nevyžaduje vizuální přístup do kontaktu, ale vyžaduje izolaci a konstrukční úpravu ložiska [1], [9]. Kapacita ložiska udává informaci o průměrné tloušťce mazacího filmu v mazaných kontaktech. Z tloušťky mazacího filmu lze vypočítat režim mazání. Kapacita může být zjištěna po časových úsecích pomocí nabíjecí charakteristiky ložiska [4], [27] nebo v reálném čase dle impedance [12], [6], [25], [16]. Pokud nastává dotyk výstupků povrchů, je zhoršeno, či přímo znemožněno měření kapacity. Metoda je proto vhodnější pro plně oddělené povrchy s parametrem mazání  $\lambda$  vyšším než je  $\sim 4$  [4], [55], což je přesně opakem odporové metody. Na to naráží studie [55], která kombinuje kapacitní metodu s odporovou tím, že k měření kapacity přidala také měření dotyků kontaktu podobně, jak je tomu u odporové metody.

## Ultrazvuková metoda

Pro použití této metody není nutné upravovat konstrukci ložiska, a také není nutný vizuální přístup do kontaktu, naproti tomu metoda vyžaduje vodní lázeň pro emitor ultrazvukových pulzů v uložení ložiska [5], [2]. Emitor nacházející se v uložení ložiska funguje zároveň jako přijímač odražených pulzů. Dle těchto odražených ultrazvukových pulzů je vyčíslena tloušťka mazacího filmu ložiska. Pro správné fungování metody musí být přesně nastavena vzdálenost emitoru od testovaného místa v ložisku [7]. Výsledky mají značný rozptyl s měnící se zátěží a rychlostí [11].

## Optická interferometrie přes optické vlákno

Metoda je založena na optické interferometrii skrze optické vlákno [47]. Na rozdíl od klasické optické interferometrie používané na tribometrech, nebyla metoda doposud aplikovaná na valivé ložisko, ani na jinou aplikaci EHD kontaktu. Lze předpokládat, že při chodu ložiska může docházet k zanášení optického vlákna kovovými částicemi přítomnými v oleji, jelikož otvor pro optické vlákno je umístěn v místě dotýkajících se ploch. Navrtání otvoru v dráze valivých elementů může také nepříznivě ovlivňovat životnost a mazání ložiska. Dle publikovaných studií není rozlišení tloušťky maziva u metody dostatečné pro měření na valivém ložisku.

## Vybrané metody

Na základě rešerše, byly zvoleny elektrické monitorovací metody jako nejvhodnější. Výběr těchto metod byl proveden kvůli několika parametrům. První požadavkem je nízká náročnost úpravy uložení ložiska. I když uložení ložiska u elektrických metod musí být odizolováno, u ultrazvukových metod musí být uložení vybaveno vodní lázní, která svou prostorností přehnaně ztěžuje a navyšuje rozměry uložení. Dalším kritériem je náročnost nastavení vybrané metody měření pro kuličkové ložisko. U ultrazvukových metod je třeba zaměřit ultrazvukový senzor do středu kontaktní oblasti, oproti tomu elektrické měřicí metody žádný analogický senzor nevyužívají. Posledním kritériem je úspěšnost samotného principu měření. Elektrické měřicí metody lze považovat jako odzkoušené již v několika pracích.

## 3.3 Cíl práce

Diplomová práce si dává za cíl vývoj metody pro monitorování režimu mazání v kuličkovém ložisku. Samotný vývoj lze rozdělit na konstrukci testovacího zařízení, konstrukci a implementaci elektrického měřicího řetězce a na ověřovací experimenty.

Výstupem této práce se stane testovací zařízení, na kterém bude možné dle elektrické měřicí metody studovat kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem, nebo radiální kuličkové ložisko.

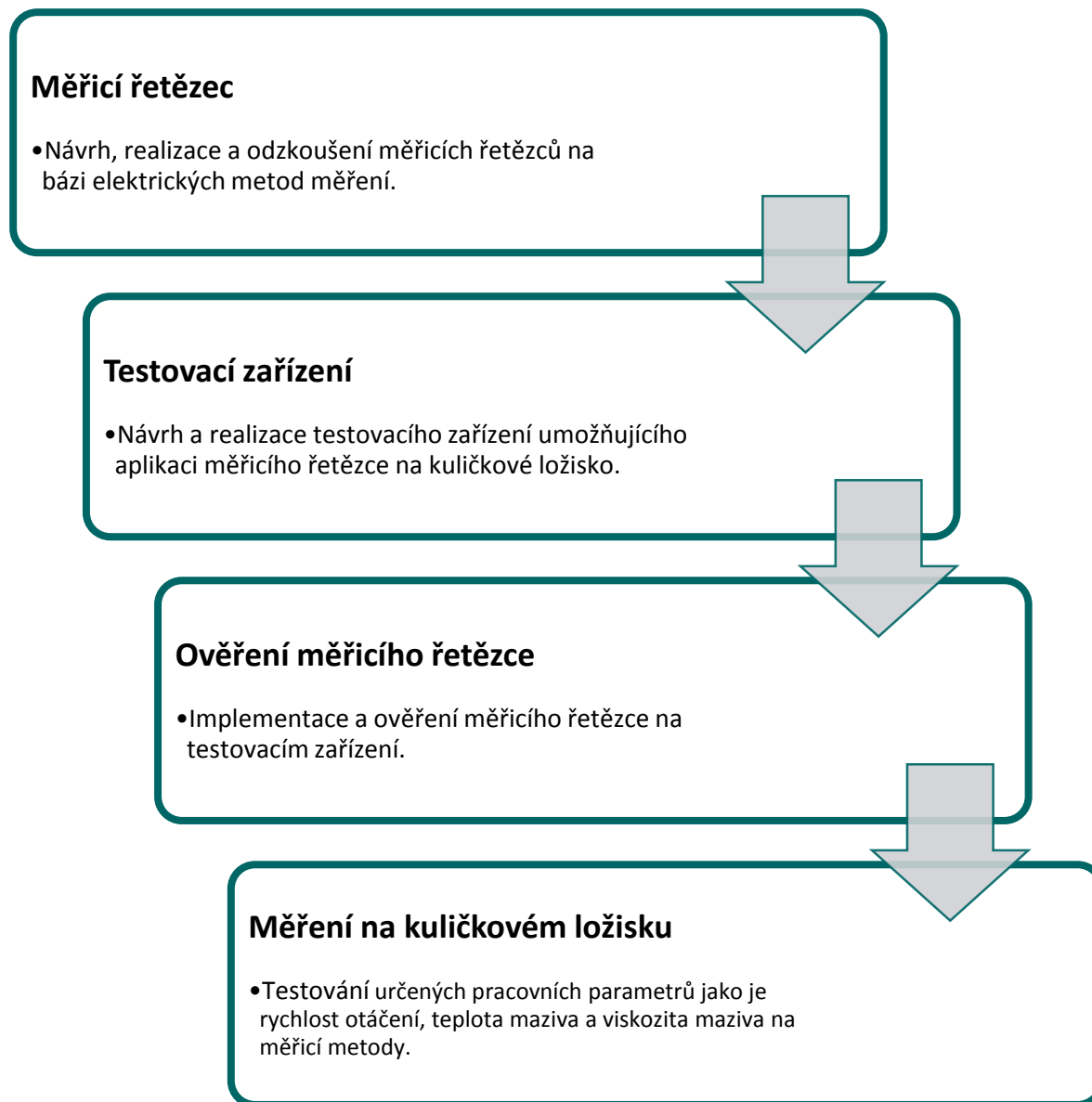
Dílčí cíle diplomové práce:

- analyzovat vhodné měřicí metody režimu mazání
- navrhnout a zrealizovat testovací zařízení
- navrhnout a zrealizovat měřicí řetězec
- implementovat měřicí řetězec do testeru a ověřit jeho funkčnost
- analyzovat výsledky a navrhnout další vývoj

## 4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

### 4.1 Postup řešení

Měření za pomoci elektrických metod lze v diplomové práci rozdělit na čtyři etapy, tyto úseky nemusí být nutně vykonávány postupně, ale ukazují jistou následnost kroků.



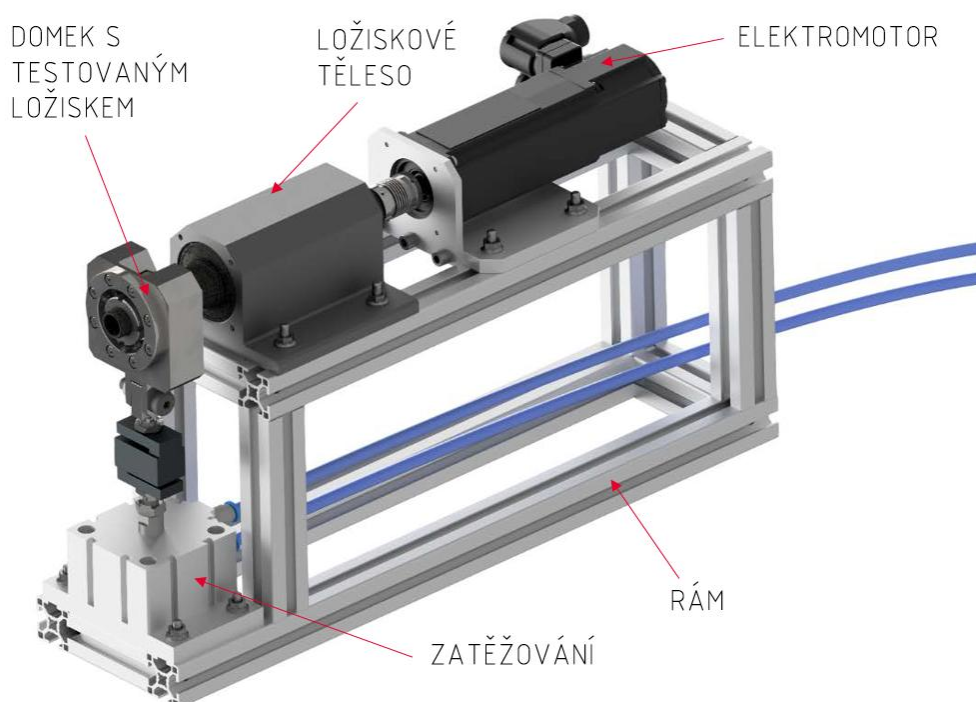
## 4.2 Testovací zařízení

Kapitola koncepce testovacího zařízení nejprve popíše návrhy testerů v rámci projektové výuky v roce 2017 a 2019 (viz kap. 4.2.1), jenž jsou výchozím stavem pro vyvíjené testovací zařízení. Poté budou rozebrány klíčové prvky finální konstrukce testovacího zařízení, které jsou: zapojení elektrického obvodu, zajištění testovaného ložiska a způsoby jeho zatěžování.

### 4.2.1 Projekty Ústavu konstruování z roku 2017 a 2019

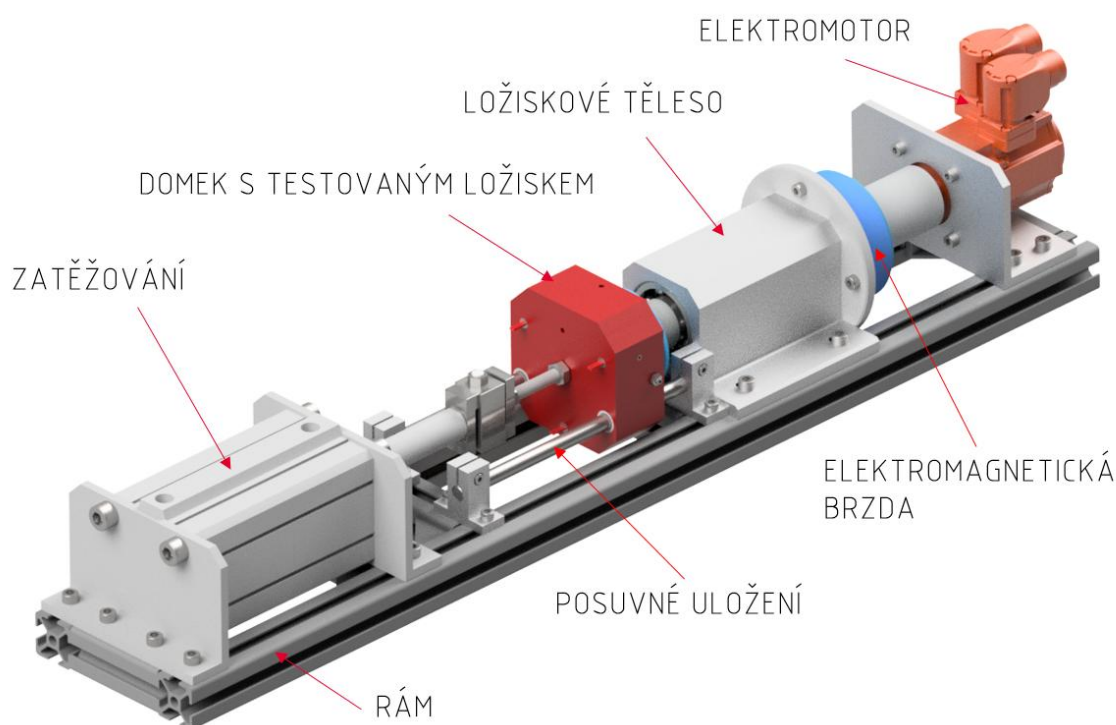
V minulých letech byly na *Ústavu Konstruování* navrženy dva testery ložisek v rámci projektové výuky [48], [49]. Projekty byly zakončeny bez realizace. Obě zařízení byla vyvinuta pro optické pozorování mazání uvnitř valivých ložisek. Návrhy těchto testerů je vhodné použít jako oporu konstrukce testovacího zařízení pro tuto diplomovou práci.

Projekt z roku 2017 [48] (viz Obr. 4-1) umožňuje optické pozorování mazaných kontaktů ložiska skrz vnější nebo vnitřní safírový ložiskový kroužek či z čela ložiska. Domek testovaného ložiska je k tomuto účelu uzpůsoben. Vnější kroužek testovaného ložiska je upevněn v ložiskovém domku a je na něj přenášena radiální síla z pneumatického válce. Vnitřní kroužek je upevněn na hřídeli, která je uložena v ložiskovém tělese. To se skládá ze dvou ložisek s kosoúhlým stykem montovaných do „O“ neboli zády k sobě. K roztočení hřídele slouží elektromotor s krouticím momentem 0,3 Nm, který je schopen docílit 8000 ot/min. Rám zařízení je vyroben ze stavebnicových profilů.



Obr. 4-1 Tester projekt ZIP 2017 [48]

V projektu z roku 2019 [49] (viz Obr. 4-2) jsou opticky hodnoceny stopy plastického maziva na vnitřním a vnějším kroužku a na valivých elementech ložiska v jeho klidovém stavu. Aby optické hodnocení bylo možné, musí být rotace zastavena v co nejkratší době (0,002 s) a musí být možné ložisko rychle rozložit. K rychlému zastavení slouží elektromagnetická brzda. Domek testovaného ložiska je navržen tak, aby umožňoval rychlou rozebíratelnost, která je zajištěna posuvným uložením domku. Pro testování bylo vybráno rozebíratelné ložisko s kosoúhlým stykem. Vnější kroužek testovaného ložiska je upevněn v ložiskovém domku a je na něj přenášena axiální síla z pneumatického válce. Vnitřní kroužek je upevněn na hřídeli, která je stejně jak u přechozího projektu z roku 2017 uložena v ložiskovém tělese. Pohon tvoří elektromotor s krouticím momentem 2 Nm, který dosahuje 6000 ot/min. Rám zařízení je taktéž vyroben ze stavebnicových profilů, stejně jako u předchozího projektu.



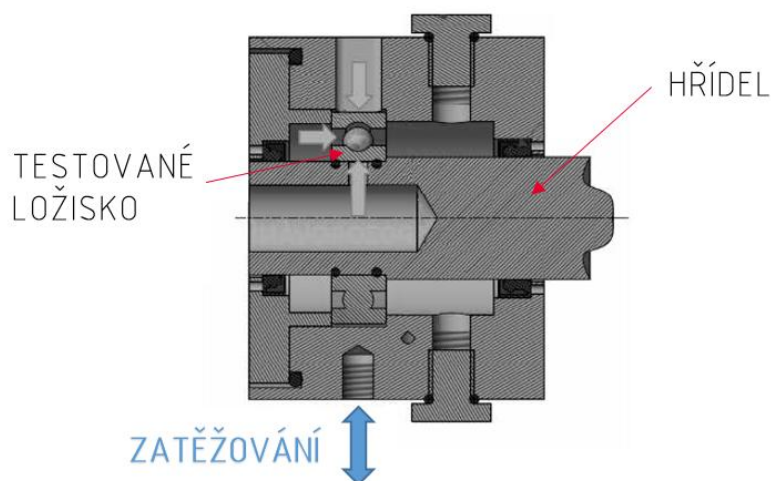
Obr. 4-2 Tester projekt ZIP 2019 [49]

#### Domek testovaného ložiska

U obou projektů je hlavní součástí zařízení domek testovaného ložiska, který musí umožňovat zamýšlené způsoby optické analýzy mazání ložiska.

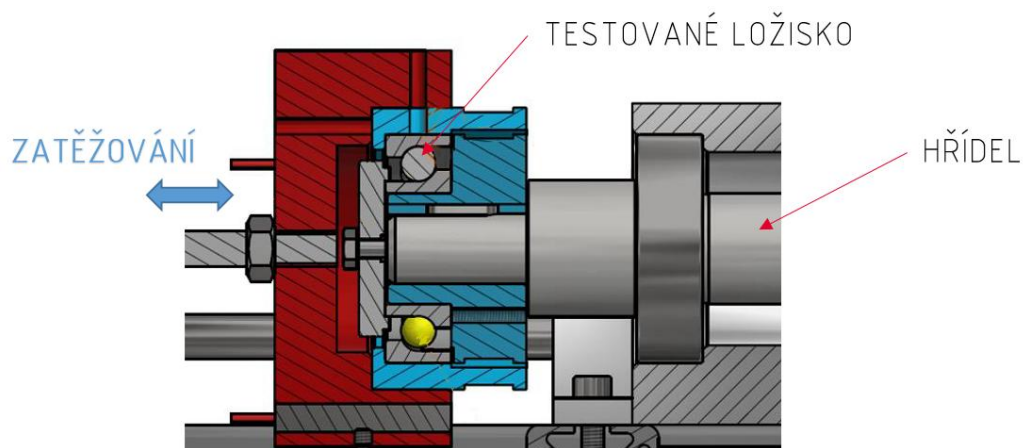
Na Obr. 4-3 lze pozorovat domek z projektu 2017 umožňující vhléd do testovaného ložiska. Uložení bylo navrženo ve dvou verzích, a to v uzavřené verzi (viz Obr. 4-3), kde je možné aplikovat mazání broděním, a ve verzi otevřené, která je vhodná pro mazání plastickým mazivem. Otevřená verze umožňuje kromě vhledu přes vnější či vnitřní ložiskový kroužek také vhléd z čelní strany. Zatěžující síla od pneumatického válce je přenášena přes šroubový spoj ze spodní části uložení.





Obr. 4-3 Uložení testovaného ložiska v projektu ZIP 2017 [48]

Domek v projektu 2019 umožňující rychlou rozebíratelnost lze vidět na Obr. 4-4. Testované ložisko s kosoúhlým stykem je zatěžováno axiální silou vyvíjenou na vnější kroužek ložiska.



Obr. 4-4 Uložení testovaného ložiska v projektu ZIP 2019 [49]

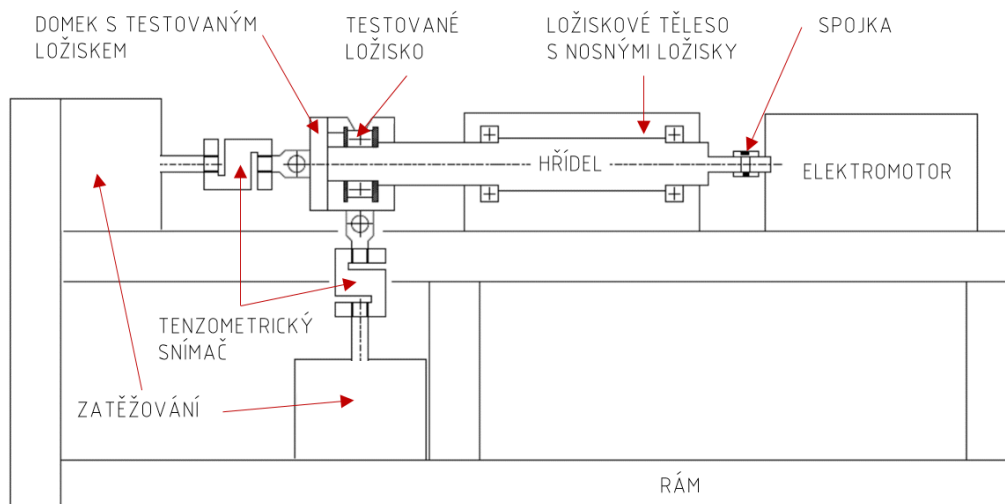
Uložení testovaného ložiska v obou projektech je vyhříváno topnými patronami, které jsou rozmístěny podél ložiskových kroužků. Vytápění umožňuje ohřev domku až na 100 °C.

## Souhrn

Pro nynější konstruované testovací zařízení bude vhodné převzít typ rámu z hliníkových stavebnicových profilů, zatěžování pneumatickým válcem, způsob zatěžování vnějšího kroužku ložiska přes domek, vyhřívání testovaného ložiska topnými patronami zabudovanými do domku, upevnění vnitřního kroužku ložiska na hřídeli a uložení hřídele v ložiskovém tělese. Z toho ložiskové těleso bude upraveno a pro zatěžování ložiska budou uvažovány i jiné varianty. Nově zkonstruovaný bude domek testovaného ložiska, zapojení elektrického obvodu, hřídel a rám zařízení s upevněním komponent.

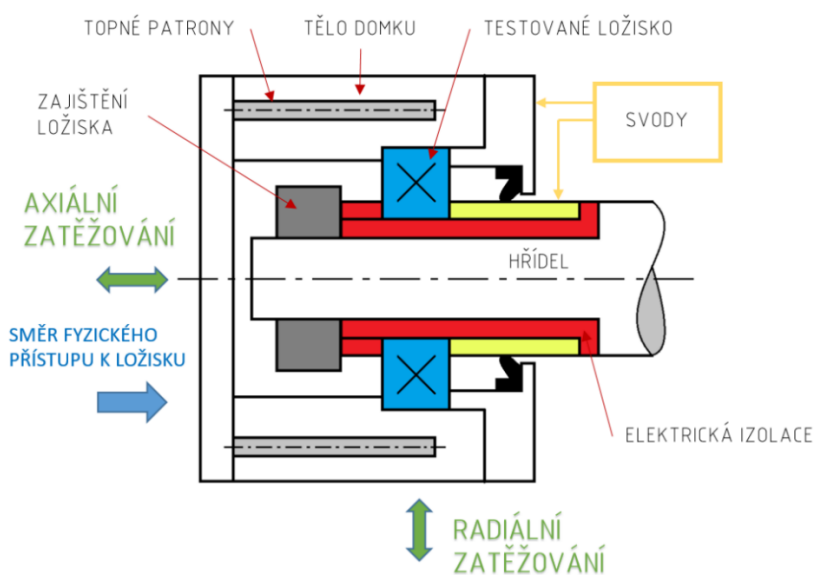
## 4.2.2 Koncepční návrh zařízení

Pro konstrukci zařízení byly vytvořeny koncepční návrhy, kde lze vidět uspořádání hlavních komponent. Celkový koncepční návrh testovaného zařízení je možné vidět na Obr. 4-5. Obsahuje hlavní části zařízení skládající se z domku s testovaným ložiskem, ložiskového tělesa, zatěžování, letmo uložené hřídele, tenzometrického snímače, elektromotoru, spojky a rámu.



Obr. 4-5 Koncepční schéma testovacího zařízení

Koncepční schéma domku s testovaným ložiskem je vyobrazeno na Obr. 4-6. Kvůli použití elektrických měřicích metod je ložisko odizolováno od zbytku zařízení a je k němu pomocí svodů připojen elektrický obvod. Vnější kroužek testovaného ložiska je zatěžován pomocí domku, na který působí axiální či radiální zatěžování. Z levé strany domku (viz Obr. 4-6.) je nutné umožnit fyzický přístup k ložisku kvůli jeho demontáži.



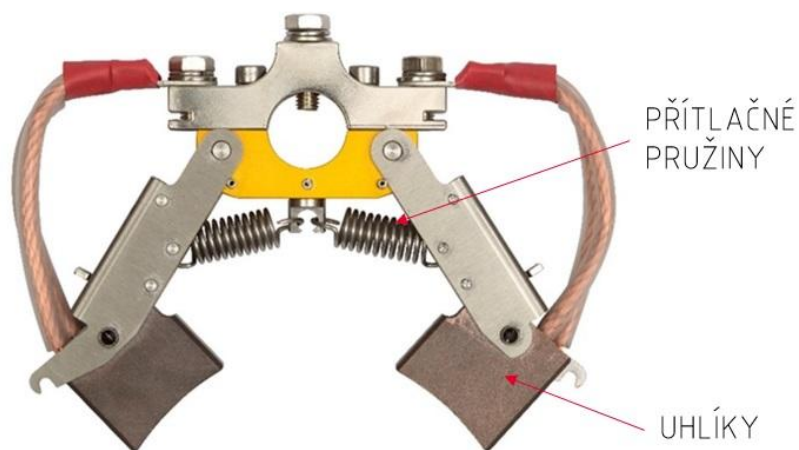
Obr. 4-6 Koncepční schéma domku s testovaným ložiskem

### 4.2.3 Zapojení elektrického obvodu

Elektrické měřicí metody vyžadují zapojení elektrického obvodu na testované ložisko. Od samotného zapojení se odvíjí konstrukce ložiskového uložení. Proto je nutné nejprve vybrat mezi způsoby propojení elektrického obvodu se součástmi na hřídeli, jejichž otáčky mohou dosáhnout až 6000 ot/min. Řešení musí být spolehlivé a jeho elektrické veličiny by měly být garantované výrobcem. Existují dvě nejčastěji užívané řešení, a to uhlíkový kartáč a rotační konektor.

#### Uhlíkový kartáč

Tato součást se hojně užívá u komutátorů v elektromotorech. Spoj elektrického obvodu je tvořen uhlíkovým blokem, jenž je přitlačován pomocí pružin na měděnou válcovou plochu (viz Obr. 4-7). Uhlíkové kartáče a systém jejich přitlaku je většinou konstruován přímo pro konkrétní zařízení, tudíž každá firma si kartáče vyvíjí sama. To znemožňuje dohledatelnost jejich provozních parametrů.

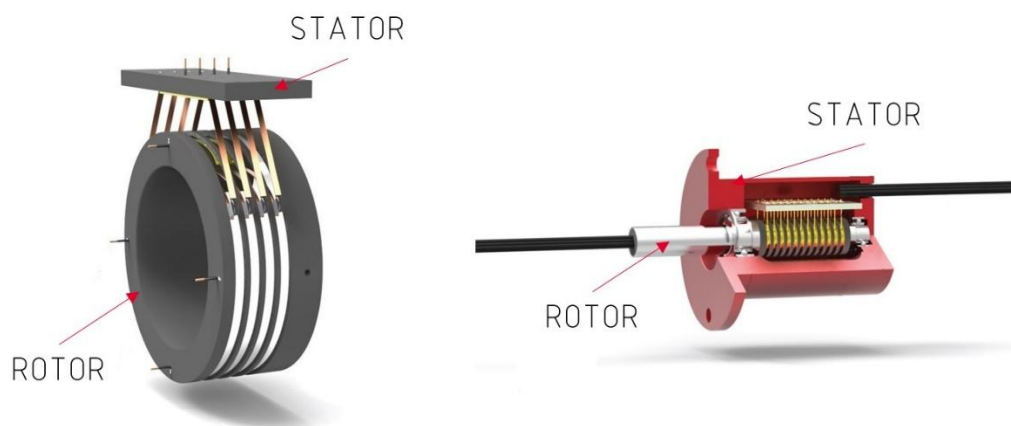


Obr. 4-7 Uhlíkový kartáč [50]

#### Rotační konektor s kovovým kartáčem

Rotačních konektorů je v prodeji celá řada. Konektor tvoří kompaktní celek, jenž může být snadno namontován na určené zařízení bez nutnosti většího konstrukčního zásahu. Jeho útroby ukrývají kovovou válcovou plochu a kovové kartáče, které se plochy dotýkají. Tento rotační konektor se vyrábí ve dvou variantách.

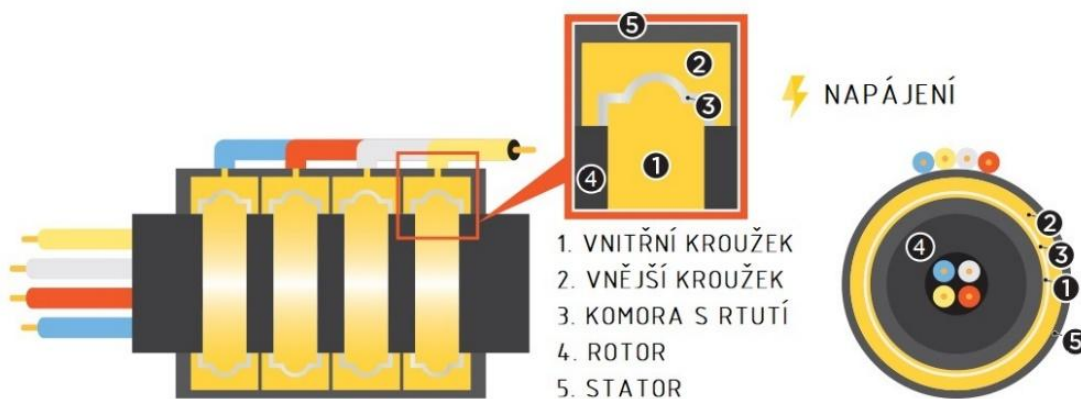
První varianta má průchozí otvor pro montáž na hřídel po její délce (viz Obr. 4-8 vpravo) a druhá varianta je uzpůsobena pro montáž ke konci hřídele stroje (viz Obr. 4-8 vlevo).



Obr. 4-8 Slip ring s otvorem (vlevo) a slip ring koncový (vpravo) [51]

### Rtuťový rotační konektor

Rotační konektory na bázi kapalného kovu skýtají několik výhod. Hlavní výhodou je minimální kontaktní odpor. Elektrické vedení je realizováno přes kapalný kov (rtuť), který spojuje stacionární a rotující člen konektoru (viz Obr. 4-9). V důsledku tohoto řešení dosahuje konektor bezúdržbového chodu, vysoké životnosti a minimálního nežádoucího šumu.



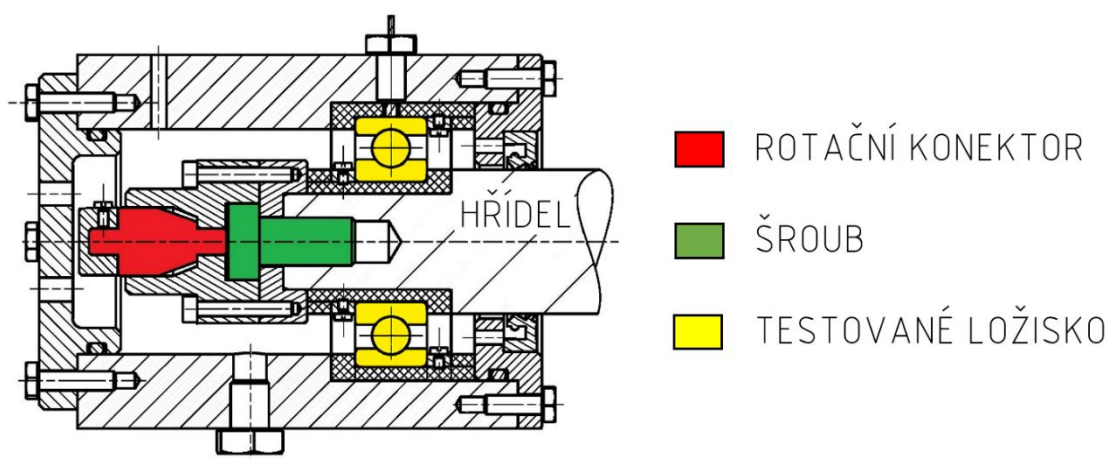
Obr. 4-9 Rotační konektor na bázi kovu [53]

#### 4.2.4 Zajištění testovaného ložiska v domku

Způsob zajištění testovaného ložiska je důležitý prvek, neboť dle toho, jak bude ložisko zajištěno, se odvíjí konstrukce většiny součástí domku a také konstrukce hřídele. Samotné zajištění testovaného ložiska je ovlivněno použitým rotačním konektorem, a proto je již nyní uvažováno s rotačním konektorem a jeho montáží ke konci hřídele. Rotační konektor s válcovým otvorem nasazený za domkem na hřídeli není uvažován, neboť by kvůli němu musela být prodloužena hřídel, na které by narostlo ohybové napětí. Uvažovány jsou dvě základní varianty zajištění testovaného ložiska v domku, a to zajištění pomocí šroubu a také pomocí matice.

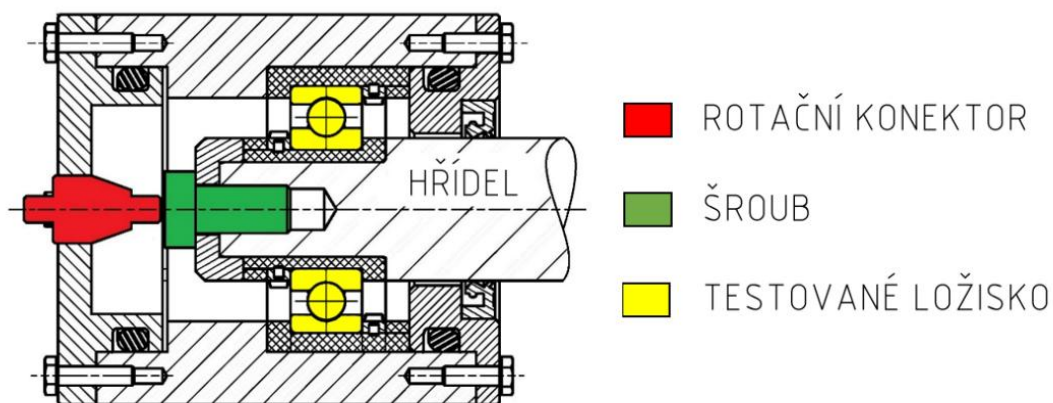
##### Zajištění pomocí šroubu

Na Obr. 4-10 lze vidět zeleně označený šroub, který zajišťuje testované ložisko. Červeně je označen rotační konektor, který propojuje elektrický obvod s hřídelí. Tím, že je zajišťující šroub a rotační konektor umístěn za sebou, vzroste celková délka domku (viz Obr. 4-10). S větší délkou domku roste jeho hmotnost a také rostou požadavky na rozměrové a geometrické tolerance zajišťující souosost axiální zatěžující síly a osy testovaného ložiska.



Obr. 4-10 Zajištění pomocí šroubu A

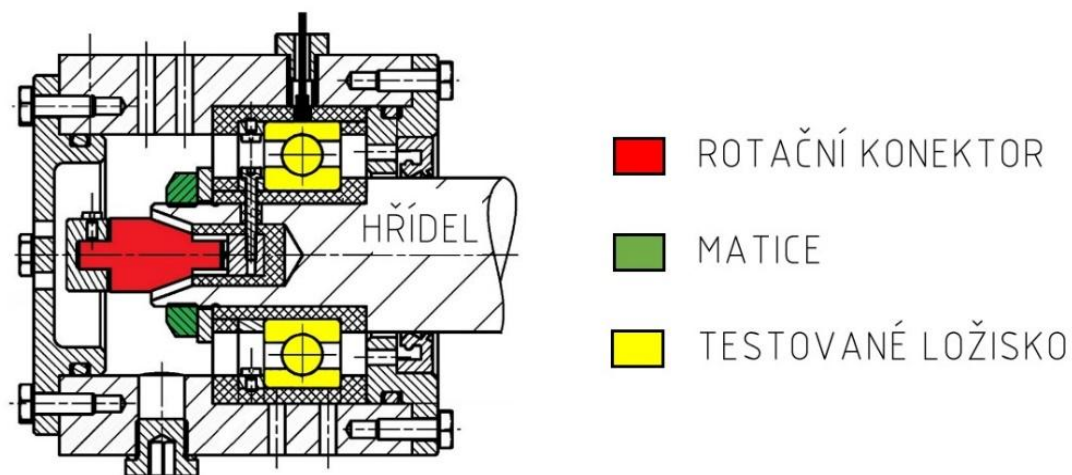
Zkrácení celkové délky domku by mohlo být provedeno vysunutím rotačního konektoru vně přes levé víčko (viz Obr. 4-11), kde by bylo upevněno. Dané víčko je však primárně určeno k připevnění zatěžujícího mechanismu. Pro tento mechanismus je tedy nutné vyvinout specifický díl přenášející zatěžující sílu.



Obr. 4-11 Zajištění pomocí šroubu B

#### Zajištění pomocí matice

Zajištění pomocí matice umožňuje vložit konektor do otvoru v hřídeli (viz Obr. 4-12), čím se zkrátí délka domku a současně i jeho hmotnost. Připojení vnitřního kroužku ložiska je provedeno pomocí šroubu, který je veden skrz hřídel. Řešení vyžaduje více dílů než obě předchozí řešení, avšak usnadňuje zapojení elektrického obvodu a jeho demontáž.

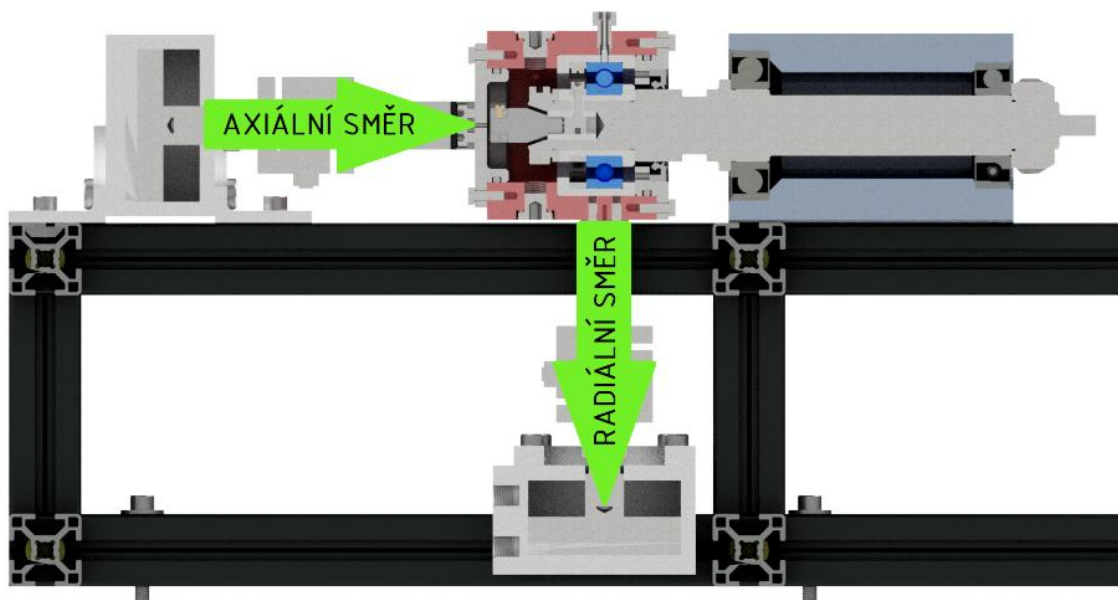


Obr. 4-12 Zajištění pomocí matice



#### 4.2.5 Způsob zatěžování

Pro potřeby testování měřicího řetězce je zvoleno radiální ložisko a ložisko s kosoúhlým stykem. Zatěžování je axiální nebo radiální (viz Obr. 4-13).



Obr. 4-13 Směry zatěžování (Pneumatický válec)

##### Zatěžování pomocí závaží

Pro radiální zatěžování měřeného ložiska by bylo možné realizovat zatěžující mechanismus obsahující sadu závaží. Axiální směr zatěžování by vzhledem ke konstrukci testeru musel být realizován pomocí systému páky či kladky, která by změnila směr zatěžování o  $90^\circ$  od vektoru gravitačního zrychlení.

##### Elektromotor s kuličkovým šroubem

Aktuátory jsou stavěny pro poměrně velký rozsah pohybu. Pokud by se tedy měly implementovat do rámu zařízení, musely by být rozměry rámu zařízení tomuto uzpůsobeny, avšak výška testovacího zařízení je limitována uvažovanou budoucí kompatibilitou s optickým pozorováním, tedy s výškami existujících mikroskopů v laboratoři.

##### Pneumatický válec

Pneumatické válce dokáží dosáhnout velkého zatížení pro malé výsuvy. Pneumatické válce jsou poměrně kompaktní zařízení s minimálními rozměry. Použití je doporučeno do míst, kde jsou již nainstalovány rozvody tlakového vzduchu.

#### 4.2.6 Navrhované materiály pro výrobu

V tab. 4-1 lze vidět materiály, které byly vybrány do užšího výběru dle korozivzdornosti, pevnosti a obrobitelnosti.

tab. 4-1 Vybrané materiály

Materiálové vlastnosti			
Hlavní díly	Označení materiálu	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnost [MPa]
Hřídel	C 45	430	650–800
	ČSN 17 140	500	650–850
	ČSN 17 145	600	950–1100
	ČSN 17 022	500-600	850–1100
Domek a ložiskové těleso	EN AW-6061	250	290
	ČSN 17 240	190	500–700
	ČSN 17 243	190	500–750
Izolační vložky	PEEK	x	90
	PA 6	x	66



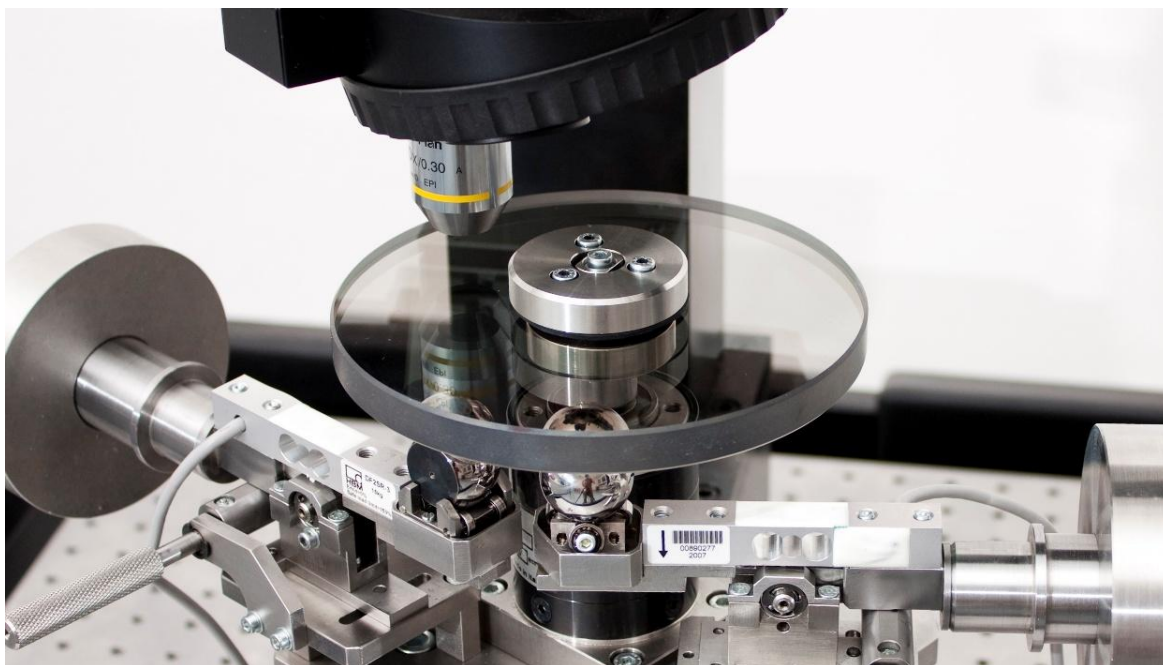
## 4.3 Měřicí řetězec

### 4.3.1 Vývoj měřicího řetězce

Pro vývoj měřicího řetězce byl použit optický tribometr *ball-on-disk* a *kolorimetrická interferometrie*. Měření pomocí *kolorimetrické interferometrie* udává ověřené tloušťky mazacího filmu a zobrazuje distribuci maziva v kontaktu. Optický tribometr *ball-on-disk* lze po určité úpravě použít i pro elektrické monitorovací metody režimu mazání. Obě metody lze použít současně a pomocí srovnání výsledných veličin je možné ověřit správnou funkci měřicího řetězce na bázi elektrických metod.

#### Optický tribometr typu ball-on-disk

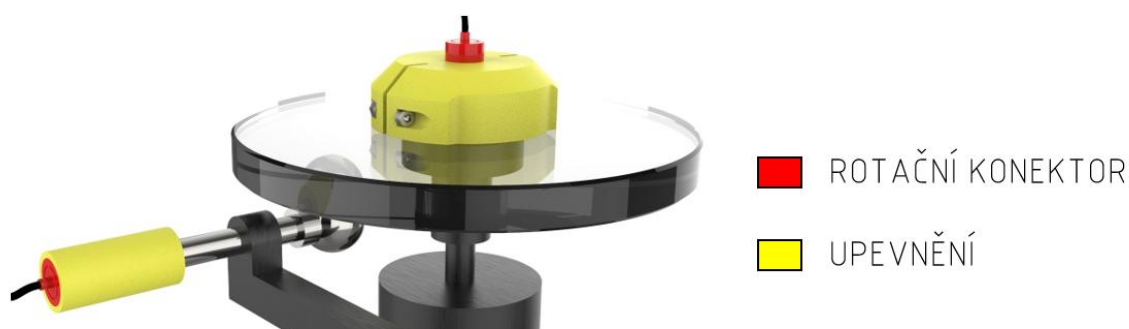
Obecně se pro simulaci kontaktů ložisek používají tzv. tribometry. Tribometry uzpůsobené pro studování kontaktu pomocí optických metod se označují jako optické. Jedním z hojně užívaných optických tribometrů je tribometr typu *ball-on-disk* (viz Obr. 4-14) [6], [16]. Jedná se o zařízení s jedním mazaným kontaktem, který se skládá z poháněného plochého disku a nepoháněné či poháněné kuličky. Obě tělesa se po sobě čistě odvalují, nebo jsou hnány s částečným skluzem. Disk je vyroben z optického skla a má z jedné strany nanesenou vrstvu chromu pro potřeby využití *kolorimetrické interferometrie*. Jelikož je daná chromová vrstva vodivá, může sloužit k propojení elektrického obvodu u elektrických měřicích metod. *Kolorimetrická interferometrie* je metoda měření založena na interferenci v bílém světle, která umožňuje měření tlouštěk mazacího filmu od 1 až do 900 nm.



Obr. 4-14 Optický tribometr ball-on-disk [54]

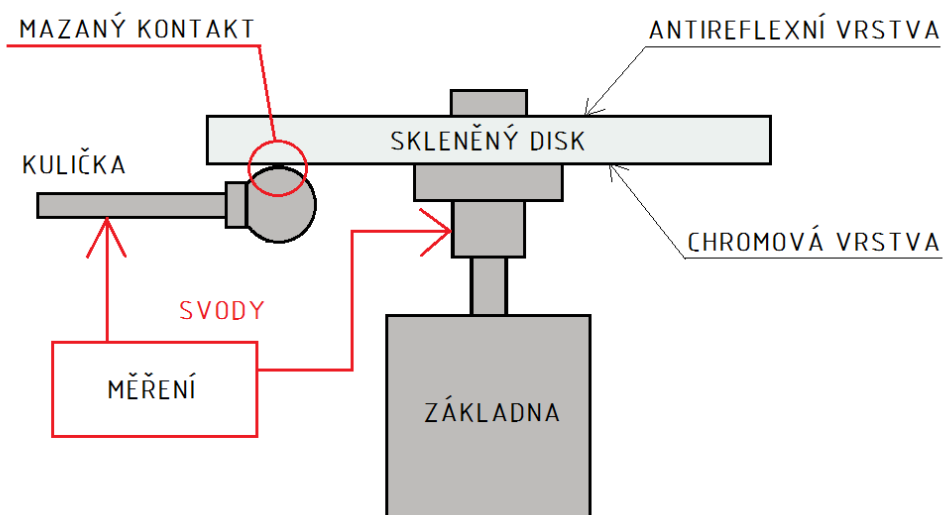
## Úprava optického tribometru

Kulička a dřík skleněného disku jsou usazeny v kostře zařízení, jež oba komponenty vodivě propojuje. Aby bylo možné zapojit měřicí elektrický obvod, musí být uložení kuličky od uložení disku odizolováno. Kvůli izolaci je vyroben plastový díl technologií FDM (Fused Deposition Modeling, 3D tisk), který nahrazuje kovovou součást upevňující kuličku. Jelikož skleněný disk a i kulička koná rotační pohyb, je pro potřeby zapojení elektrického obvodu nutné použít rotační konektory (viz Obr. 4-15). Byly vybrány koncové rotační konektory s kovovým kartáčem s označením „Miniature Slip Ring“, které jsou schopné přenést napětí o maximální hodnotě 240 V a proud maximálně 2 A. Upevnění rotačních konektorů je taktéž tvořeno plastovými díly FDM (viz Obr. 4-15).



Obr. 4-15 Rotační konektory a jejich upevnění

Po provedených konstrukčních úpravách je docíleno toho, aby elektrický proud byl spojen vodivou cestou pomocí rotačního konektoru do kuličky, z kuličky skrz měřený mazaný kontakt, z kontaktu následně přes chromovou vrstvu disku do jeho dříku a z dříku je sveden rotačním konektorem (viz Obr. 4-16).



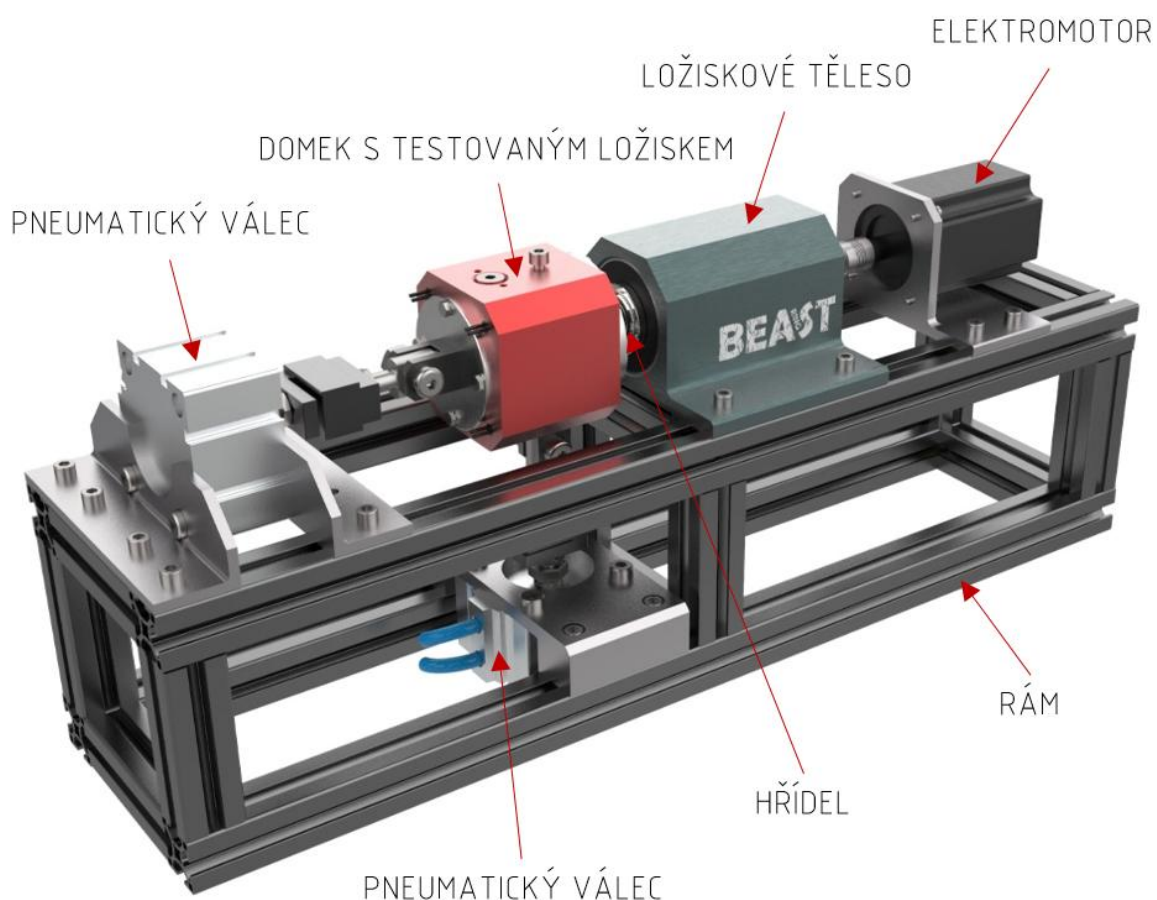
Obr. 4-16 Schéma konstrukční úpravy tribometru

## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Kapitola se skládá z konstrukce testovacího zařízení a z konstrukce měřicího řetězce. V konstrukci testovacího zařízení je popsáno testovací zařízení s klíčovými prvky, na které je implementován měřicí řetězec. V konstrukci měřicího řetězce je popsán měřicí obvod, metody měření a výsledky s testovacího měření.

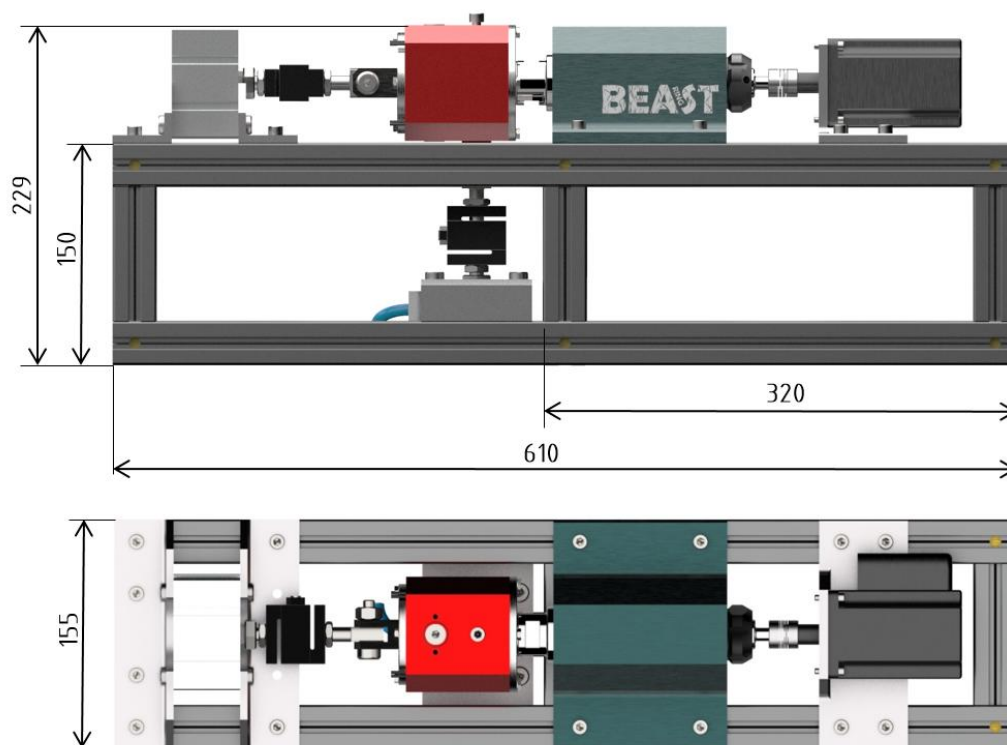
### 5.1 Testovací zařízení

Základní schéma zkonstruovaného zařízení lze pozorovat na Obr. 5-1. Jeho hlavní částí je červeně označený domek testovaného ložiska. Domek umožňuje studium elektrickým metod měření. V domku je upevněn vnější kroužek testovaného ložiska. Vnitřní kroužek ložiska je upevněn na hřídeli, která je uložena v zeleně označeném ložiskovém tělese. Hřídel je poháněna elektromotorem. Zatěžování testovaného ložiska umožňuje pneumatický válec a měření zátěžné síly tenzometrický snímač. Celé zařízení propojuje rám z hliníkových stavebnicových profilů.



Obr. 5-1 Schéma testovacího zařízení

Základní rozměry zařízení lze pozorovat na Obr. 5-2. Jsou na něm také vyobrazené obě konfigurace zatížení testovaného ložiska současně a to axiální (pneumatický válec v ose hřídele) a radiální (pneumatický válec v pravém úhlu od osy hřídele).



Obr. 5-2 Základní rozměry

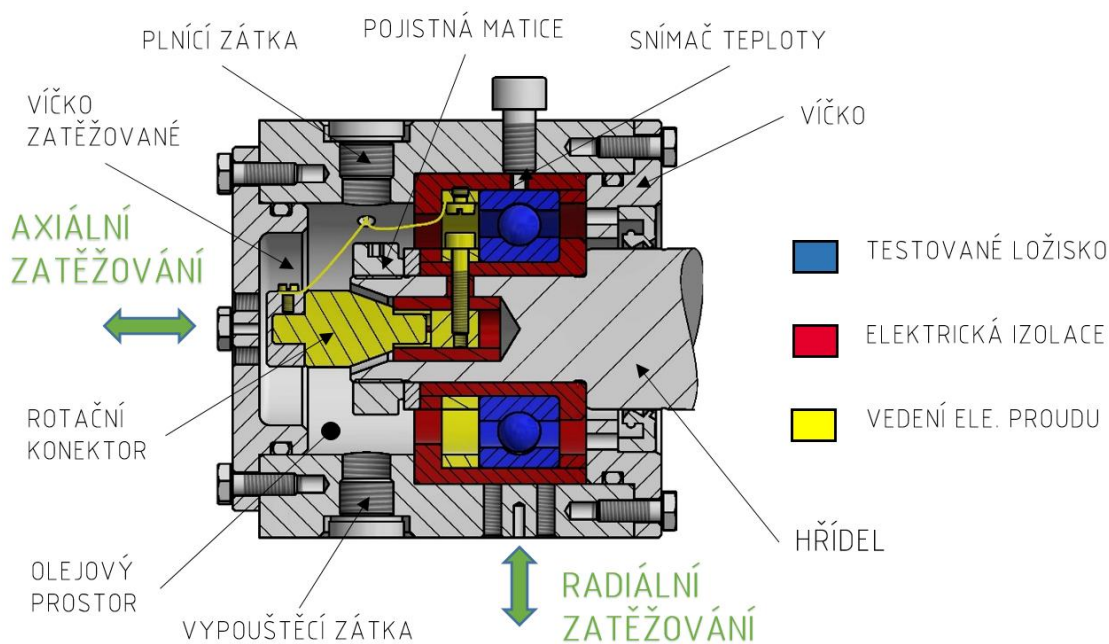
Základní parametry zařízení lze pozorovat v tab. 5-1. Parametry čítající rozměry zařízení, otáčky motoru, teplotu u testovaného ložiska a zatížení ložiska byli zvoleny již při zadání diplomové práce. Zvolené maximální zatížení je desetinou základní dynamické únosnosti testovaných ložisek *SKF 6205* a *SKF 7205 BE-2RZP* a jeho hodnota je 1,5 kN. Parametry rotačního konektoru vychází z rešeršní části této práce.

tab. 5-1 Základní parametry

Základní požadavky	
Maximální rozměry testeru (d / š / v)	800 mm / 180 mm / 250 mm
Otáčky motoru	0 - 6000 ot/min
Teplota u testovaného ložiska	20 - 100 °C
Zatížení testovaného ložiska (axiální, radiální)	0 - 1,5 kN
Maximální rozměry rotačního konektoru	Ø16-30 mm
Přenášená frekvence rotačním konektorem	0 - 200 MHz
Maximální otáčky rotačního konektoru	0 - 7500 ot/min
Kontaktní odpor rotačního konektoru	<1 mΩ

### 5.1.1 Domek s testovaným ložiskem

Domek testovaného ložiska je klíčová součást zařízení sloužící k aplikaci elektrickým měřicích metod (viz Obr. 5-3). Hlavní díly tvoří modře označené testované ložisko, červeně označená elektrická izolace a žlutě označené díly pro vedení elektrického proudu. Domek umožňuje axiální i radiální zatěžování testovaného ložiska. Kvůli použití elektrických měřicích metod je testované ložisko odizolováno od hřídele a od samotného domku pomocí plastových vložek z nylonu 6 (PA6). K elektrickému propojení rotujícího vnitřního kroužku ložiska slouží rtuťový rotační konektor s označením *MERCOTAC Model 105*. Konektor byl vybrán především kvůli jeho minimálním rozměrům, teplotní odolnosti, maximálním použitelným otáčkám a hodnotě kontaktního šumu. V těle domku jsou zabudovány čtyři topné patrony a teplotní čidla kvůli regulaci teploty. Domek je uzavřen víčky a zatěsněn *O-kroužky*, kvůli mazání broděním. Upevnění ložiska je zajištěno pojistnou *KMFE* maticí. Zajištění maticí bylo vybráno kvůli možnosti vložení rotačního konektoru do otvoru hřídel, což umožňuje minimalizaci rozměrů celého domku a také snadnou demontáž rotačního konektoru.



Obr. 5-3 Domek testovaného ložiska

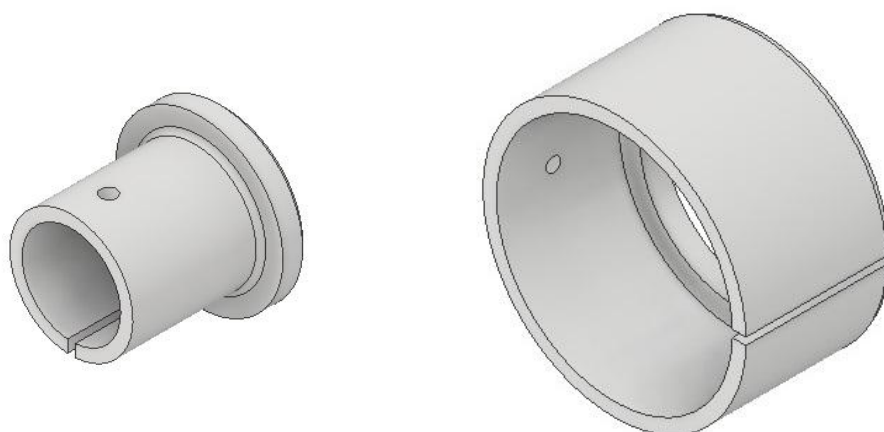
Vedení elektrického proudu lze vidět na Obr. 5-3 označené žlutou barvou. Vodič vstupuje do domku horním otvorem a je připevněn šroubem ke kovovému kroužku. Kovový kroužek doléhá na vnější kroužek testovaného ložiska a tím ho elektricky propojuje. Elektrický proud dále protéká z vnějšího ložiskového kroužku přes mazané kontaktní oblasti ložiska do vnitřního ložiskového kroužku. Ložiskový kroužek je elektricky spojen s doléhajícím kovovým kroužkem, který je pomocí šroubu spojen s kotvicí částí rotačního konektoru. Ze statorové části rotačního konektoru je nakonec vodič vyveden ven z domku skrze horní otvor.



## Ověření funkčnosti izolačních vložek dle teplotní analýzy

Velmi důležitým prvkem jsou izolační vložky v domku testovaného ložiska, které zabezpečují elektrické odizolování testovaného ložiska od těla zařízení. Vložky jsou vyrobeny z nylonu 6 (PA6) a jsou usazeny v těle domku z korozi-vzdorné oceli. Nylon 6 (PA 6) má na rozdíl od korozi-vzdorné oceli asi 10 x větší tepelnou roztažnost. Tepelná roztažnost oceli činí  $17 \cdot 10^{-6} /K$  a tepelná roztažnost nylonu 6 (PA6) je  $147 \cdot 10^{-6} /K$ . Jelikož celý domek je uzpůsoben tak, aby testované ložisko mohlo být ohřáto pomocí topných patron až do teploty 100 °C, mohou být kvůli zmíněnému rozdílu v tepelné roztažnosti izolační vložky přílišně namáhány.

Byla provedena analýza v programu *ANSYS Workbench*., kde byl použit modul *Steady-State Thermal*, z kterého byly přenášeny výsledky do modulu *Static Structural*. Tento přenos slouží k vyčíslení napětí na tepelně deformované součásti. Do analýzy vstupovaly dvě geometrie a dva montážní stavy s vůlí a bez vůle. Dvě geometrie izolačních vložek jsou tvořeny celistvými a přerušenými vložkami (viz Obr. 5-4). Vůle je tvořena mezi vnějším izolačním kroužkem a víčkem domku (na hřídeli) a mezi vnitřním izolačním kroužkem a pojistnou maticí na hřídeli.

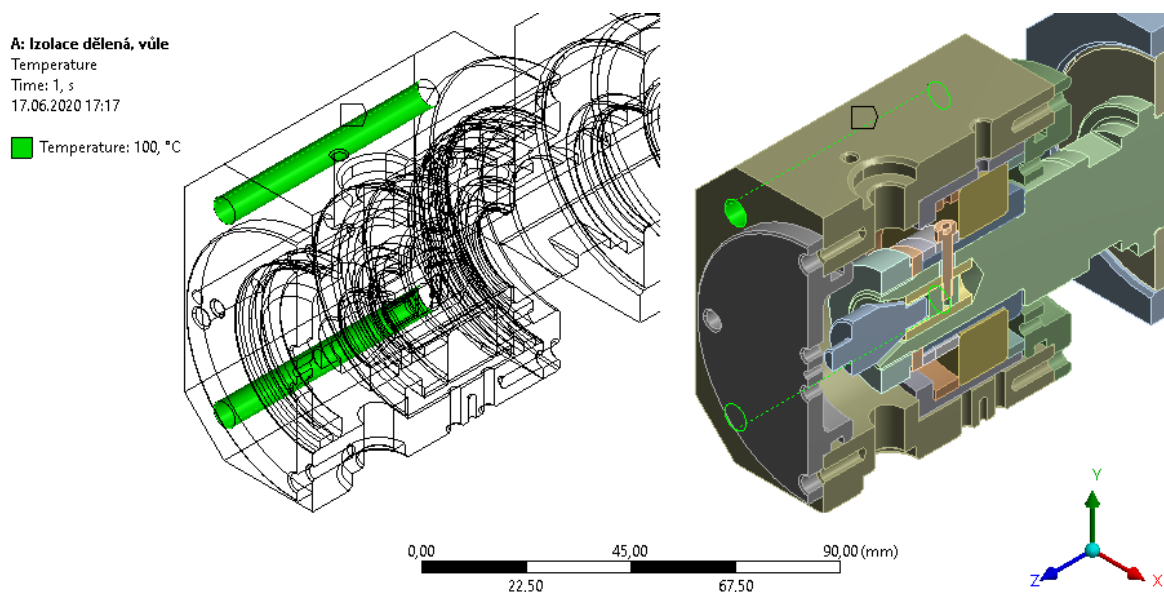


Obr. 5-4 Geometrie přerušené izolační vložky

Cílem analýzy je při 100 °C určit vhodnou geometrii izolačních vložek na základě výsledných napětí a zjistit, zda izolační vložky nebudou vyšší teplotou přílišně namáhány.

#### 5.1.1.1 Okrajové podmínky

Ohřev domku je předepsán na zeleně označených plochách otvorů na Obr. 5-5, které jsou vytvořené pro topné patrony. Teplota je nastavena na 100 °C.



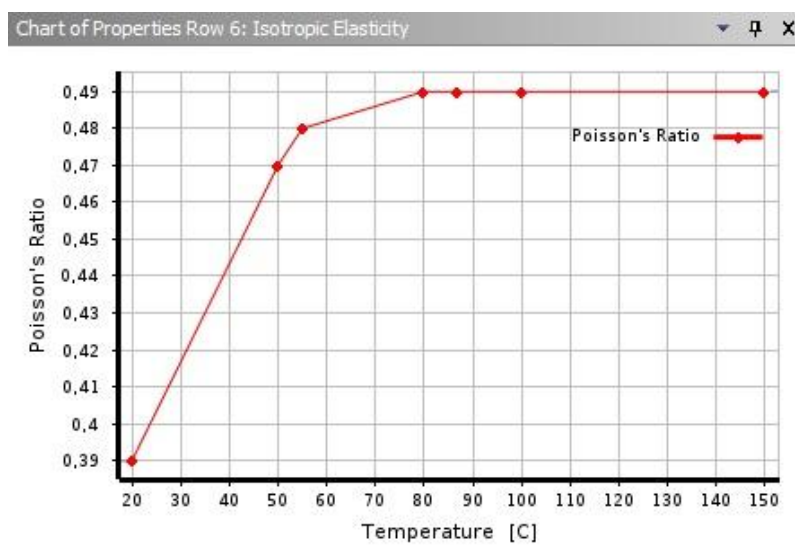
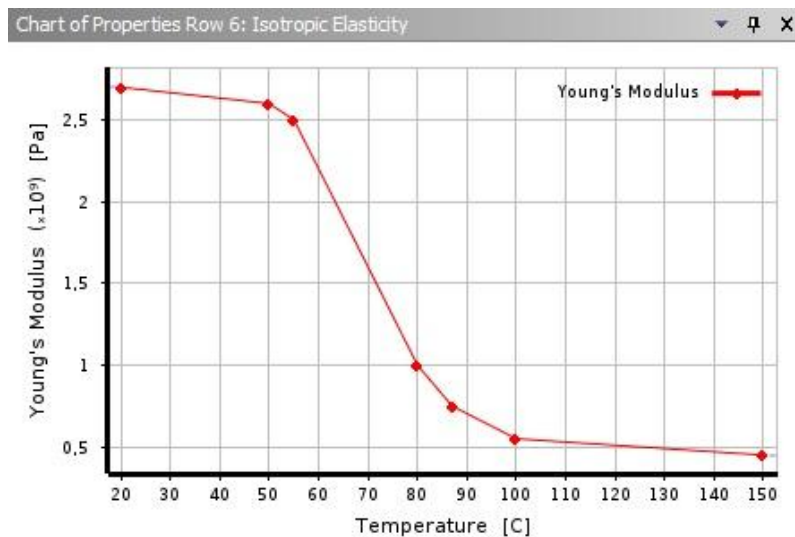
Obr. 5-5 Ohřev (ANSYS Workbench)

V programu je nastavena konvekce do okolí o teplotě 22 °C přes všechny vnější plochy zařízení.

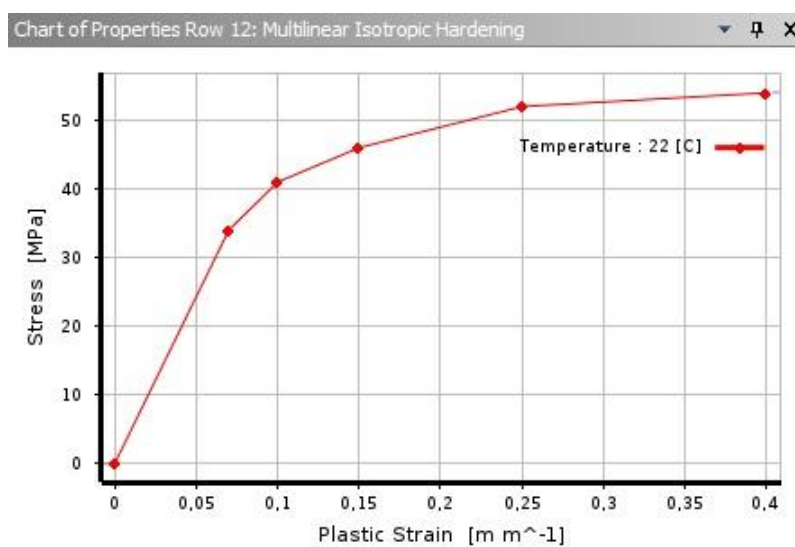
Materiály jednotlivých částí jsou voleny dle skutečné konstrukce. Domku testovaného ložiska, hřídeli a ložiskovému tělesu je přiřazena korozivzdorná ocel. Určitým prvků, které tvoří vodivé spojení testovaného ložiska, je přiřazena konstrukční ocel. Největší zřetel je kladen na izolační vložky.

Materiál izolačních vložek nylon 6 je pro potřeby analýzy popsán třemi způsoby. Jednotlivé charakteristiky materiálu jsou popsány následovně:

- Materiálový model A - Lineární materiál nylon 6
  - Modul pružnosti  $E = 1,06 \text{ GPa}$
  - Poissonova konstanta  $\mu = 0,35$
  - Koeficient tepelné roztažnosti  $\alpha = 147 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
  - Izotropní součinitel teplotní vodivosti  $\lambda = 0,243 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
  - Mez pevnosti PA6 (při 100 °C)  $R_a = 20 \text{ MPa}$
- Materiálový model B - Lineární materiál nylon 6 s teplotní závislostí
  - hodnoty z materiálu A doplněné o změnu mechanických vlastností dle teploty, zadané hodnoty lze vidět na Obr. 5-6.
- Materiálový model C - Nelineární materiál nylon 6 s multilineárním izotropním zpevněním
  - hodnoty v prvku *multilinear isotropic hardening* jsou zadané dle Obr. 5-7.



Obr. 5-6 Graf udávající závislosti Yangova modulu a Poissonova čísla na teplotě (ANSYS Workbench)

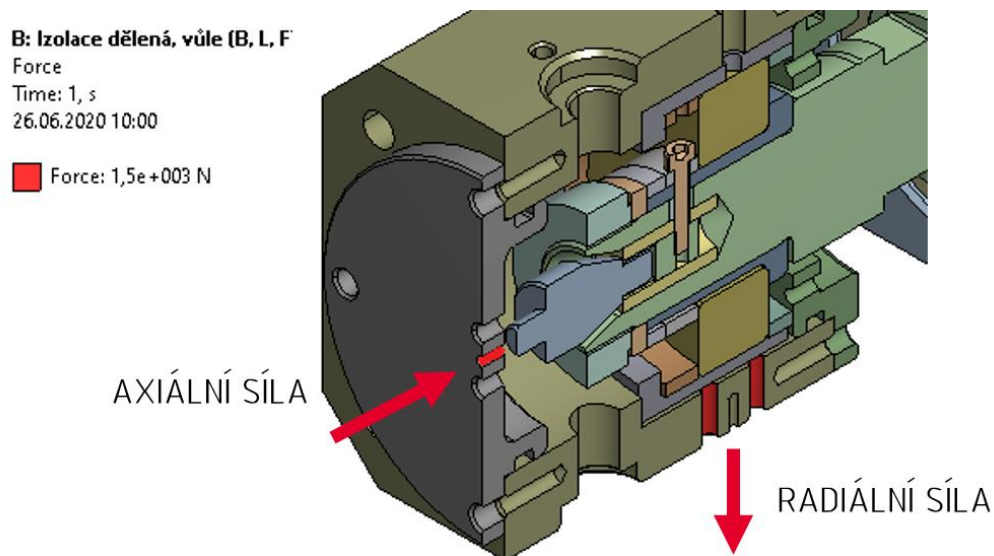
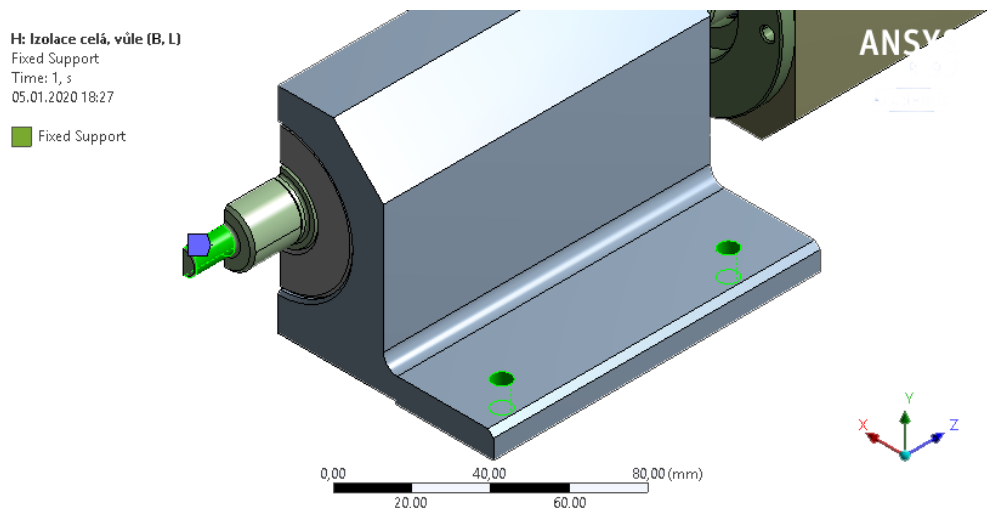


Obr. 5-7 Nelineární charakteristika nylonu 6 (ANSYS Workbench)



Materiál A jako materiál s lineární charakteristikou je použit pro výběr vhodné geometrie na základě minimálního napětí na izolačních kroužcích. Daný materiál je také použit pro určení nutných vůlí mezi izolačními vložkami a částmi domku. Materiály A, B, C jsou použity pro posouzení bezpečnosti.

Zavazbení celku je provedeno pomocí pevných vazeb na plochách otvorů pro šrouby v podpůrném domku a v místě upnutí vlnovcové spojky pro motor. Plochy s vazbami jsou zeleně označené na Obr. 5-8 nahoře.

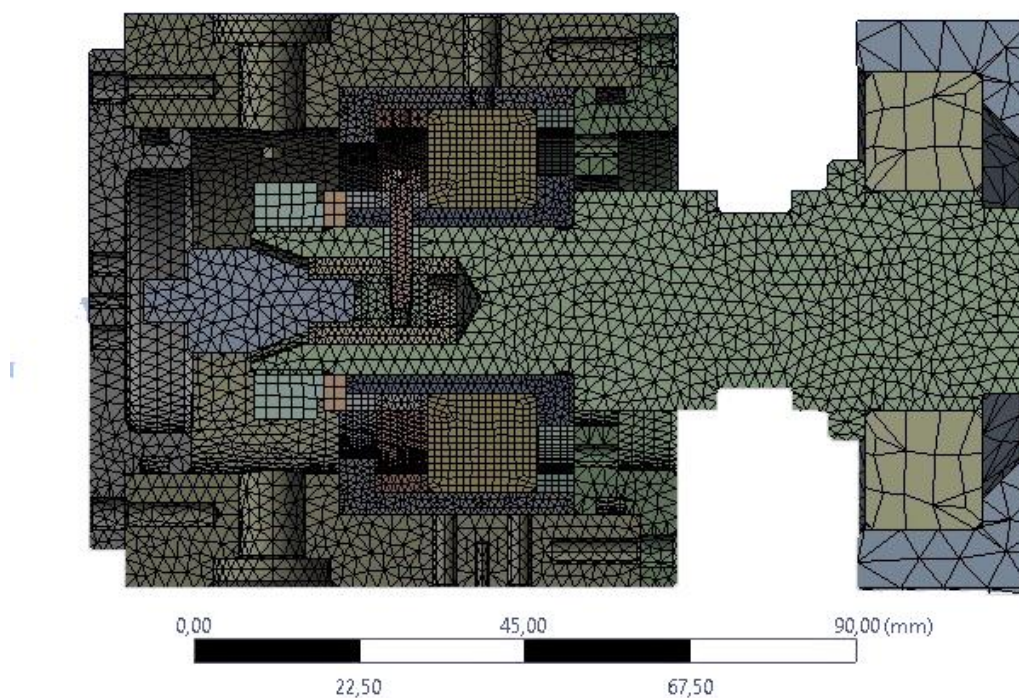


Obr. 5-8 Zavazbení celku (nahoře) a zatížení silami (dole) (ANSYS Workbench)

Vazby v domku s testovaným ložiskem zohledňují dvě geometrie a dva montážní stavy s vůlí a bez vůle. Detail vazem lze pozorovat v příloze 1.

Kvůli výpočtu bezpečnosti je na ložiskový domek předepsáno zatížení axiální a radiální silou 1,5 kN. Tato síla je předepsána na plochy víčka a spodní části domku (viz Obr. 5-8 dole).

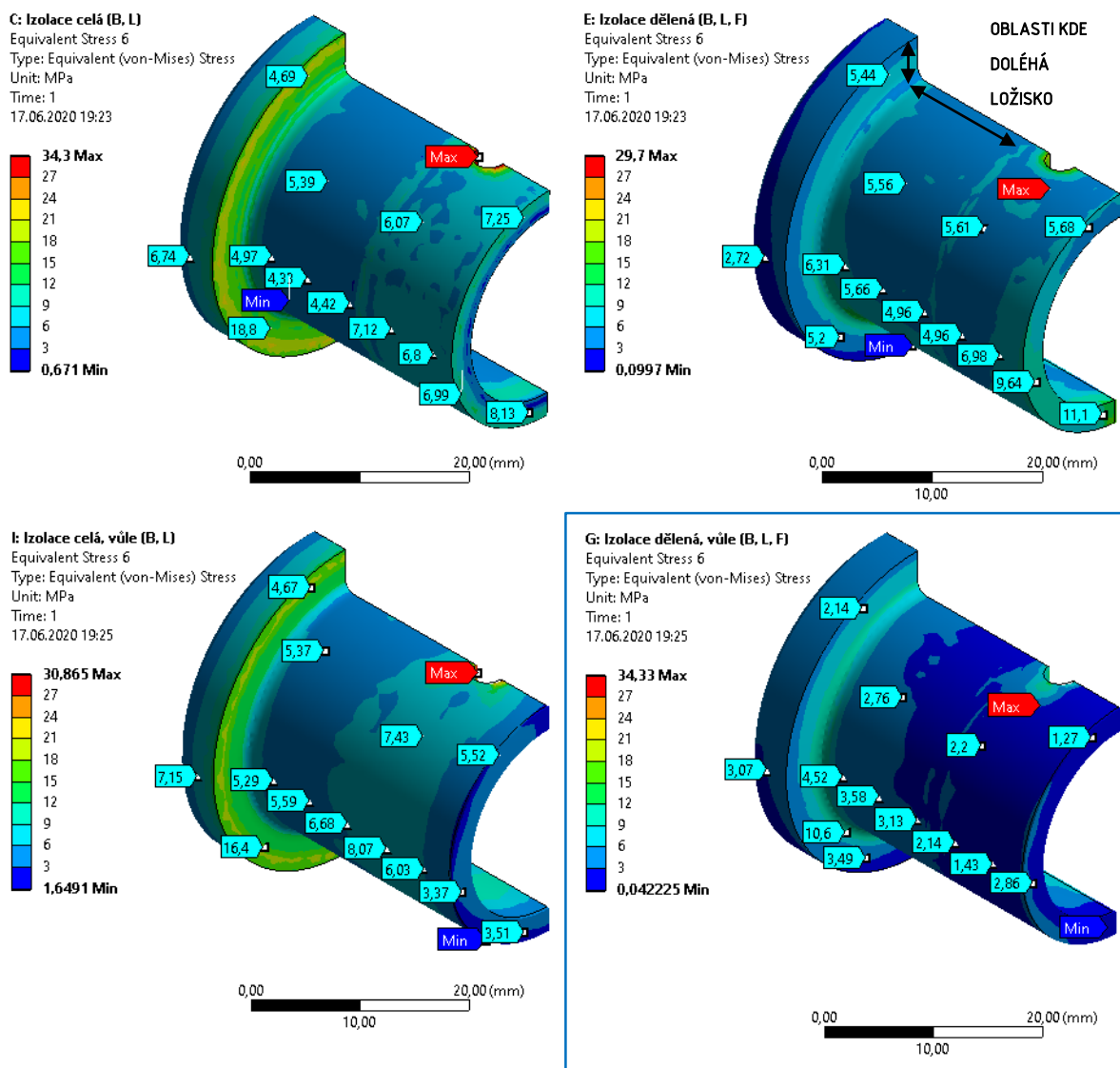
Výpočtová síť (viz Obr. 5-9) je tvořena čtyřstěny (typ tetrahedron) o délce stěny 6 mm, 2 mm a 1 mm. Z čehož rozměry prvků jsou přiřazeny dílům dle důležitosti a velikosti.



Obr. 5-9 Výpočtová síť pro výpočet izolačních vložek (ANSYS Workbench)

#### 5.1.1.2 Výsledky

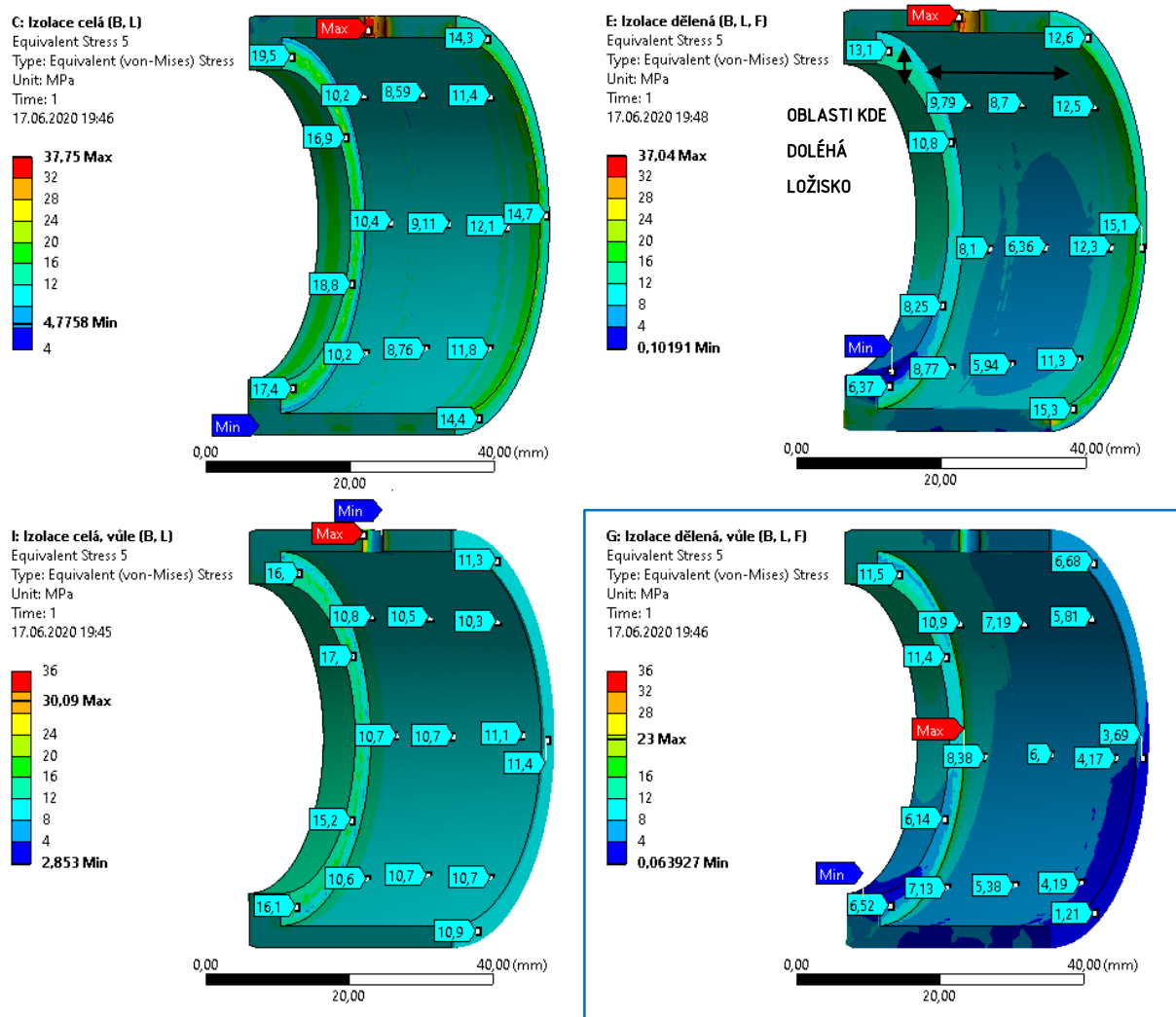
Napětí na vnitřním kroužku pro dvě zvolené geometrie a dva montážní stavy lze vidět na Obr. 5-10. Barevná škála napětí je u všech čtyřech variant stejná kvůli snadnějšímu porovnání dosaženého napětí. Napětí je porovnáváno v místech, kde doléhá zatěžované testované ložisko. Místa jsou označena černými šipkami na Obr. 5-10 nahoře vpravo. Není uvažováno místo v oblasti otvoru, kde prochází šroub, neboť tento otvor nemá významný vliv na funkci zařízení.



Obr. 5-10 Napětí na vnitřních vložkách dle geometrie a montáže

Z výsledků (viz Obr. 5-10) je patrné, že nejnižší napětí jak v oblasti, kde doléhá ložisko (2–11 MPa), tak i na větší části vložky, vychází ve variantě s **přerušenou izolační vložkou s vůlí**.

Napětí na vnějším kroužku pro dvě zvolené geometrie a dva montážní stavy je vyobrazeno na Obr. 5-11. Barevná škála napětí je u všech čtyřech variant identická kvůli porovnání napětí. Stejně jak u vnitřní vložky je i zde porovnáváno napětí v místech, kde doléhá zatěžované testované ložisko. Tato místa jsou označena černými šipkami na Obr. 5-11 nahoře vpravo. Totožně jako u vnitřní vložky není uvažováno místo v oblasti otvoru, kde prochází šroub, neboť tento otvor nemá významný vliv na funkci zařízení.

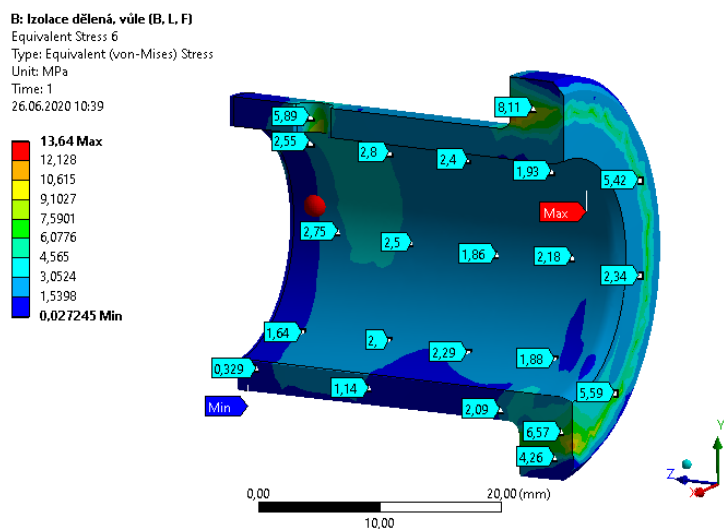


Obr. 5-11 Napětí na vnějších vložkách dle geometrie a montáže

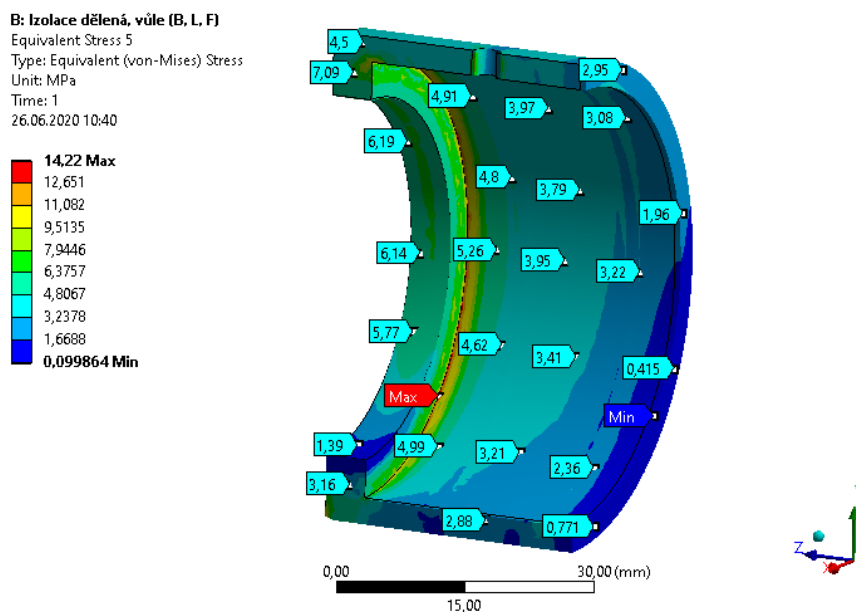
Z výsledků (viz Obr. 5-11) je vidět, že nejnižší napětí jak v oblasti, kde doléhá ložisko (4–12 MPa), tak i na většině části vložky, vychází ve variantě s **přerušenou izolační vložkou s vůlí**.

Pro obě izolační vložky, vnější i vnitřní, je vybrána varianta s **přerušenou izolační vložkou s vůlí**. Vybrána byla kvůli nejnižšímu napětí na funkčních částech izolační vložky. K analýzám byl použit lineární materiál nylon 6 (označený jako model materiál A). Dosahované napětí může být kvůli použitému materiálovému modelu A vyšší nežli skutečné hodnoty, avšak v tomto případě není důležité přesné vyčíslení napětí, ale porovnání dosahovaných napětí mezi čtyřmi posuzovanými verzemi.

Další částí výsledků tepelné analýzy izolačních vložek je posouzení dosaženého maximálního napětí a bezpečnosti izolačních vložek. V tomto případě bylo vybíráno mezi všemi třemi definovanými materiály A, B, C. Materiál s multilineárním izotropním zpevněním (označován jako materiál C) byl vybrán jako materiál, jehož výsledky se nejvíce blížily realitě. Výsledky lze pozorovat na Obr. 5-12 a Obr. 5-13. Maximální napětí na vnějším izolačním kroužku je 14,2 MPa a jeho bezpečnost vůči mezi pevnosti 20 MPa je 1,4. Maximální napětí na vnitřním izolačním kroužku je 13,6 MPa a jeho bezpečnost vůči mezi pevnosti 20 MPa je 1,5. Obě zmíněné hodnoty bezpečnosti jsou přijatelné. Navíc lze předpokládat, že reálná bezpečnost bude vyšší, jelikož u definovaného materiálu C nebylo uvažováno s vlivem teplotního nárůstu elasticity.



Obr. 5-12 Napětí na vnějším kroužku (ANSYS Workbench)

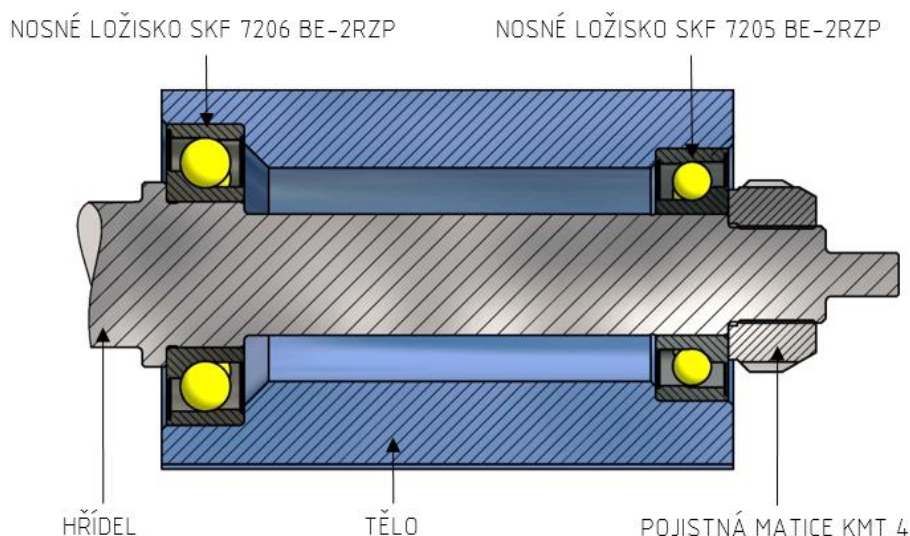


Obr. 5-13 Napětí na vnitřním kroužku (ANSYS Workbench)



### 5.1.2 Ložiskové těleso

Ložiskové těleso vycházelo z konstrukce z projektů 2017 a 2019, které byly součástí projektové výuky na *Ústavu konstruování*. Radiální zatížení působící na ložisko blíže k domku je několikanásobně větší než na druhé ložisko ložiskového tělesa. Trvanlivost více zatíženého ložiska je tedy mnohem menší než druhého ložiska v podpůrném domku. Aby byly doby trvanlivosti obou ložisek srovnatelnější, je cílem nahradit ložisko blíže k domku ložiskem s větší základní dynamickou únosností (viz Obr. 5-14 vlevo). Výpočet lze pozorovat níže.



Obr. 5-14 Ložiskové těleso

#### Výpočet sil na ložiska v ložiskovém tělese při radiálním zatěžování

Síly působící na ložiska, které je možné vidět v Obr. 5-15 jsou vypočítány pomocí rovnic statické rovnováhy:

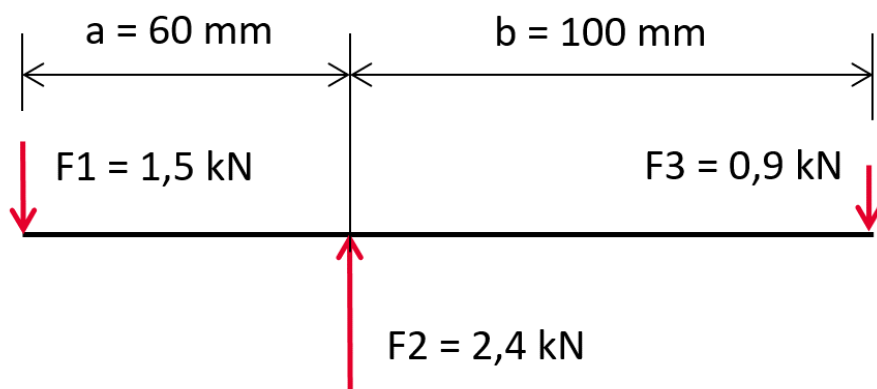
$$\Sigma F_y = 0; \quad F_1 + F_3 - F_2 = 0 \quad (12)$$

$$\Sigma M_3 = 0; \quad F_1 \cdot (a+b) - F_2 \cdot b = 0 \quad (13)$$

$$F_2 = (F_1 \cdot (a + b)) / b = (1,5 \cdot (60 + 100)) / 100 = 2,4 \text{ kN} \quad (14)$$

$$F_3 = F_2 - F_1 = 2,4 - 1,5 = 0,9 \text{ kN} \quad (15)$$

kde  $F_1$  je síla působící na testované ložisko,  $F_2$  je síla působící na nosné ložisko v kN,  $F_3$  je síla působící na druhé ložisko ložiskového tělesa v kN,  $a$  je osová vzdálenost testované ložisko od bližšího ložiska v podpůrném domku v mm a  $b$  je osová vzdálenost mezi ložisky v ložiskovém tělese.



Obr. 5-15 Silové zatížení

Aby obě ložiska v podpůrném domku měla srovnatelnou dobu trvanlivosti, měla by být hodnota poměru mezi základní dynamickou únosností a zatížením  $C/P$  obou ložisek v podpůrném domku co nejblíže. Je voleno mezi ložiskem s označením 7205 BE-2RZP se základní dynamickou únosností  $C$  14,8 kN a ložiskem o třídu větším s označením 7206 BE-2RZP se základní dynamickou únosností  $C$  22,5 kN.

$$C_{7205}/P_{F2} = 14,8 / 2,4 = 6,2 \quad (16)$$

$$C_{7206}/P_{F2} = 22,5 / 2,4 = 9,4 \quad (17)$$

$$C_{7205}/P_{F3} = 14,8 / 0,9 = 16,4 \quad (18)$$

Poměr mezi základní dynamickou únosností a zatížením  $C/P$  vychází u (původního) ložiska 7205 BE-2RZP na místě většího zatížení na 6,2 (16). Nahrazením tohoto ložiska ložiskem o jednu třídu větším 7206 BE-2RZP stoupne poměr na 9,4 (17). U druhého ložiska 7205 BE-2RZP má poměr hodnotu 16,4 (18). Použitím většího ložiska na více zatíženém místě se rozdíl mezi poměry úplně nevyrovná, avšak rozdíl lze již označit jako přijatelný, neboť dalším zvětšováním ložiska by muselo být znatelně zvětšeno uložení v podpůrném domku, což je vzhledem k nárůstu hmotnosti a velikosti nepřijatelné.

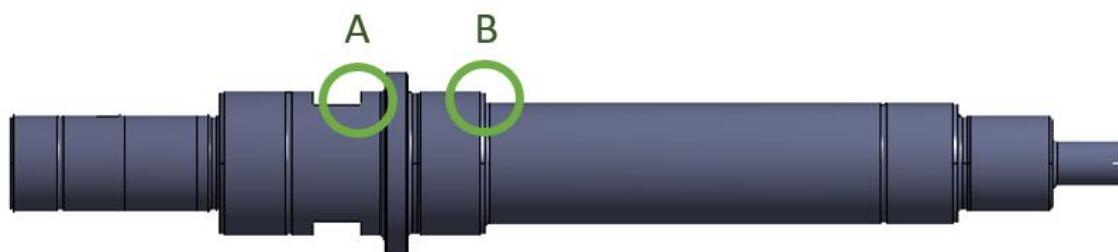
### 5.1.3 Vybrané testované ložisko a jeho úpravy

Pro testování byly vybrány dva typy valivých kuličkových ložisek. Specificky pro axiální způsob zatěžování ložisko s kosoúhlým stykem s označením 7205 BE-2RZP a pro radiální způsob zatěžování radiální kuličkové ložisko s označením 6205. Oba typy ložisek mají shodné rozměry, tím je zajištěna jejich snadná přeměna. Jejich základní dynamické únosnosti jsou také totožné, a to 14,8 kN. Rozměrová řada ložisek je volena tak, aby bylo možné testovací zařízení přetvořit na zařízení vizuálně analyzující kontakt v ložisku mikroskopem skrze safírový kroužek [39]. A proto je záměrem, aby současné zařízení bylo kompatibilní s tímto typem měření.

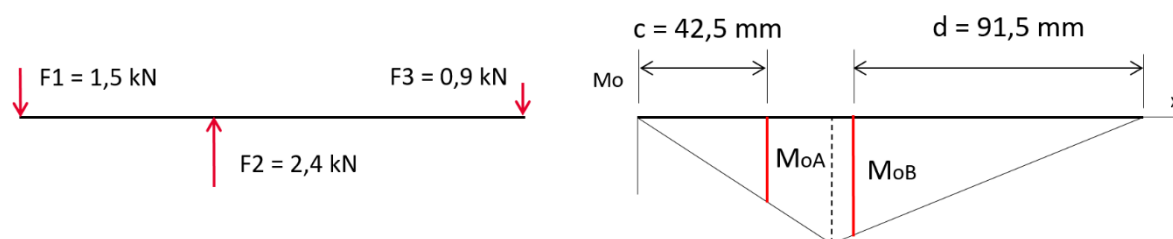
Ložisko s kosoúhlým stykem 7205 RE-2RZP má ložiskovou klec vyrobenou z polyamidu. U radiálního kuličkového ložiska 6205 je klec vyrobena z kovu. Pro potřeby testování měřicích metod je nutné, aby ložisková klec nebyla z vodivého materiálu. Pro účely měření je u radiálního kuličkového ložiska nahrazena kovová ložisková klec klecí, která je vyrobená pomocí FDM (Fused Deposition Modeling, 3D tisku).

#### 5.1.4 Posouzení bezpečnosti hřídele

Rozměry hřídel jsou voleny dle zvolených ložisek. To znamená že, hřídel není přímo navrhována dle jejího namáhání. I přesto byla při návrhu hřídel kontrolována bezpečnost. Jako nebezpečná místa, kde by mohla vzniknout plastická deformace, byly označeny dvě oblasti. Jde o oblasti s největším ohybovým momentem se současným zúžením průřezu. Označeno je místo s ploškami pro klíč (viz Obr. 5-16 A) a místo se změnou průměru (viz Obr. 5-16 B).



Obr. 5-16 Nebezpečné místa na hřídeli vůči bezpečnosti



Obr. 5-17 Síly a momenty na hřídeli

Nejprve byly vypočítány ohybové momenty (Obr. 5-17) ve vybraných nebezpečných místech hřídele dle působících sil (viz kap. 0) dle rovnic:

$$M_{oA} = F_1 \cdot c = 1500 \cdot 42,5 = 63750 \text{ N}\cdot\text{mm} \quad (19)$$

$$M_{oB} = F_3 \cdot d = 900 \cdot 91,5 = 82350 \text{ N}\cdot\text{mm} \quad (20)$$

kde  $M_{oA}$  je ohybový moment v místě A v N·mm,  $M_{oB}$  je ohybový moment v místě B v N·mm,  $c$  je osová vzdálenost od testovaného ložiska k místě A v mm,  $d$  je osová vzdálenost od podpůrného ložiska v ložiskovém tělese k místu B v mm,  $F_1$  je síla působící na testované ložisko a  $F_3$  v N je síla působící na podpůrné ložisko v N.



Pro usnadnění výpočtu bezpečnosti v místě A (viz Obr. 5-16), je počítáno se zúžením namísto výřezu pro klíč. Průřezový modul v ohybu je ve zvolených místech následující:

$$W_{oA} = \pi \cdot D_A^3 / 32 = \pi \cdot 24^3 / 32 = 1357,2 \text{ mm}^3 \quad (21)$$

$$W_{oB} = \pi \cdot D_B^3 / 32 = \pi \cdot 25^3 / 32 = 1534,0 \text{ mm}^3 \quad (22)$$

kde  $W_{oA}$  je průřezový modul v místě A v  $\text{mm}^3$ ,  $W_{oB}$  je průřezový modul v místě B v  $\text{mm}^3$ ,  $D_A$  je průřez v místě A v mm a  $D_B$  je průřez v místě B v mm.

V místě A je součinitel tvaru  $\alpha_A = 2,5$  a v místě B je součinitel tvaru  $\alpha_B = 2$ . V obou místech je následně vyčísleno ohybové napětí:

$$\sigma_{oA} = \alpha_A \cdot (M_{oA} / W_{oA}) = 2,5 \cdot (63750 / 1357,2) = 117,4 \text{ MPa} \quad (23)$$

$$\sigma_{oB} = \alpha_B \cdot (M_{oB} / W_{oB}) = 2 \cdot (82350 / 1534,0) = 107,4 \text{ MPa} \quad (24)$$

kde  $\sigma_{oA}$  je napětí v místě A v MPa,  $\sigma_{oB}$  je napětí v místě B v MPa,  $\alpha_A$  je součinitel tvaru pro místo A a  $\alpha_B$  je součinitel tvaru pro místo B.

V místě A se nachází maximální napětí na hřídeli. Na tomto místě je tedy kontrolována bezpečnost vůči mezi kluzu  $Re$  materiálu hřídele ČSN 17 022. Rovnice lze vidět zde:

$$k = Re / \sigma_{oA} = 500 / 117,4 = 4,3 \quad (25)$$

Bezpečnost hřídele  $k$  v místě maximálního napětí vyšla 4,3. Hřídel tedy nebude plasticky deformována s dostatečnou bezpečností.

### 5.1.5 Rám

Rám je sestaven ze stavebnicových profilů o rozměrech 30x30 mm z materiálu EN AW-6060. Jedná se o systém, který umožňuje rychlé sestavení rámové konstrukce s předem normovaných prvků. Základní rozměry rámové konstrukce jsou (d / š / v) 610 mm / 155 mm / 150 mm. Jednotlivé profily jsou spojeny pomocí centrálních šroubů, které jsou zašroubovány do střední díry profilů na jejich čelech.

### 5.1.6 Pohon

Pohon bude zajištěn elektromotorem označeným jako „8LVA22.ee030ffgg-0“ od firmy *B&R Industrial Automation*. Motor je k dispozici ve školní laboratoři a jeho parametry jsou pro pohon testovaného ložiska více než dostatečné, viz projekt 2017 [40]. Maximální otáčky elektromotoru jsou 6600 ot/min a maximální točivý moment je 2 Nm.

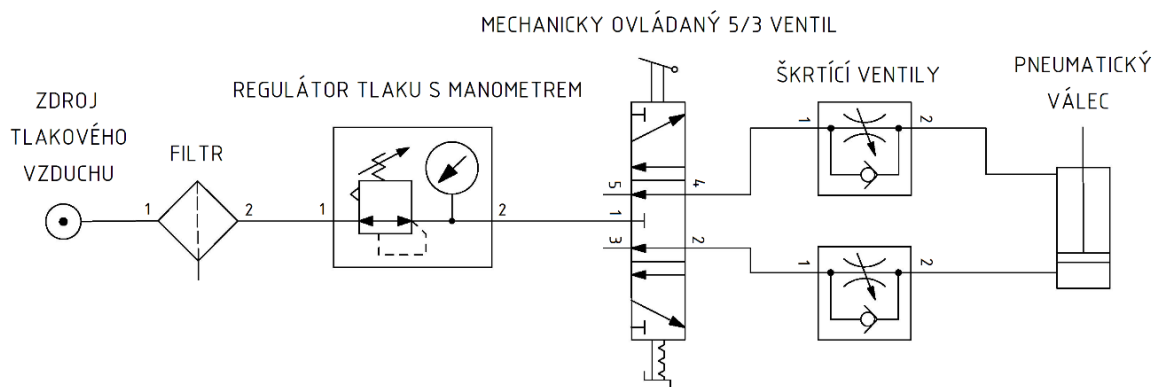
### 5.1.7 Zatěžování

Pro zatěžování byl vybrán dvojčinný pneumatický válec s krátkým zdvihem ADVC-63-10-I-P od firmy *Festo*. Pneumatické zatěžování bylo voleno s přihlédnutím na pneumatické rozvody ve školních laboratořích, a také na kompaktní rozměry pneumatických válců. Parametry vybraného zařízení lze vidět v tabulce 5-2.

tab. 5-2 Pneumatický válec - info

Pneumatický válec - technické informace	
Funkce	dvojčinný
Průměr pístu	63 mm
Zdvih	10 mm
Teoretická síla při 6 barech, pohyb vpřed	1870 N
Teoretická síla při 6 barech, pohyb vzad	1750 N

Pro řízení pneumatického válce je použit regulátor tlaku s manometrem od firmy *Festo* a pneumatický pákou ovládaný směrový ventil firmy *Viking Extreme*. Pomocí tohoto regulátoru a směrového ventilu bude manuálně nastaven tlak v pístu dle velikosti síly získané z měření pomocí tenzometrického snímače. Pneumatický obvod lze pozorovat na obr. 5-3.



Obr. 5-3 Pneumatický obvod

### 5.1.8 Použité materiály

Hřídel, domek s víčky a podpůrný domek jsou vyrobeny z korozivzdorného materiálu. Konkrétně hřídel je vyrobena z materiálu ČSN 17022 a je zušlechtěna na  $48 \pm 2$  HRC. Domek s víčky a podpůrný domek je vyroben z materiálu ČSN 17240. Izolační vložky jsou vyrobeny z materiálu nylon 6 (PA6).

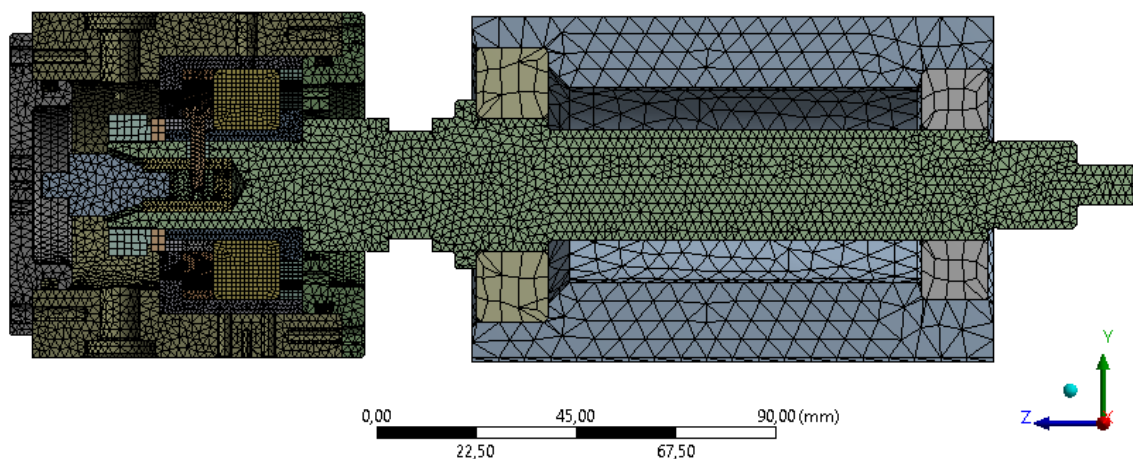
### 5.1.9 Teplotní analýza vedení tepla

Důvodem analýzy je ověření, zda nemůže docházet při déle trvajícím měření k přehřívání ložisek v ložiskovém tělese a elektromotoru. Testované ložisko je pro potřeby testování ohříváno přes topné patrony v domku až na teplotu  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jak se projeví ohřev domku na celém zařízení je analyzováno v programu *ANSYS Workbench* a jeho modul *Steady-State Thermal*.

#### Okrajové podmínky

Ohřev domku je předepsán na plochách otvorů (viz Obr. 5-5) vytvořených pro topné patrony. Teplota je nastavena na  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V programu je nastavena konvekce do okolí o teplotě  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  přes všechny vnější plochy. Materiály jednotlivých částí jsou voleny dle skutečné konstrukce. Jejich výpis je stejný jako u analýzy v kapitole 5.1.1.1.

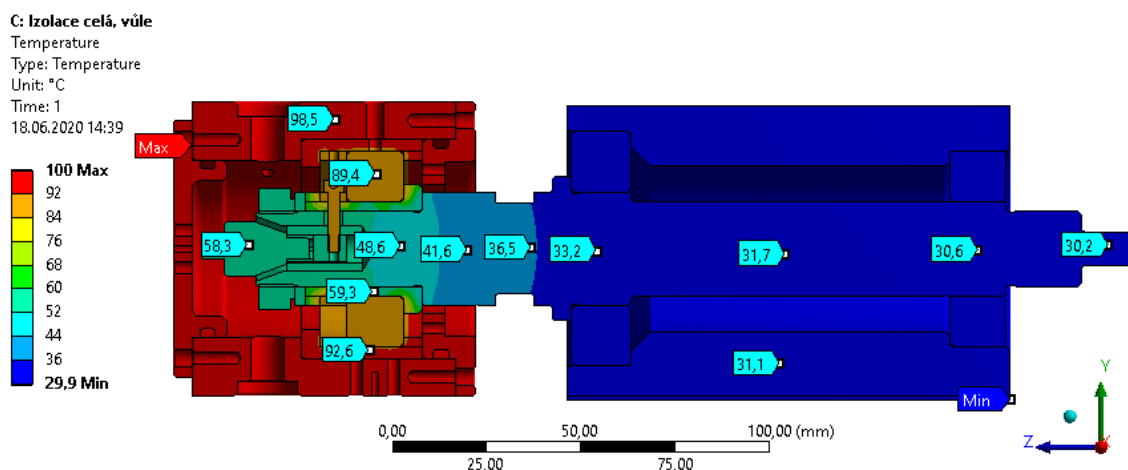
Výpočtová síť (viz Obr. 5-18) je tvořena čtyřstěny (typ tetrahedron) o délce stěny 6 mm, 2 mm a 1 mm, čehož rozměry prvků jsou přiřazeny dílům dle důležitosti a velikosti.



Obr. 5-18 Výpočtová síť celku (ANSYS Workbench)

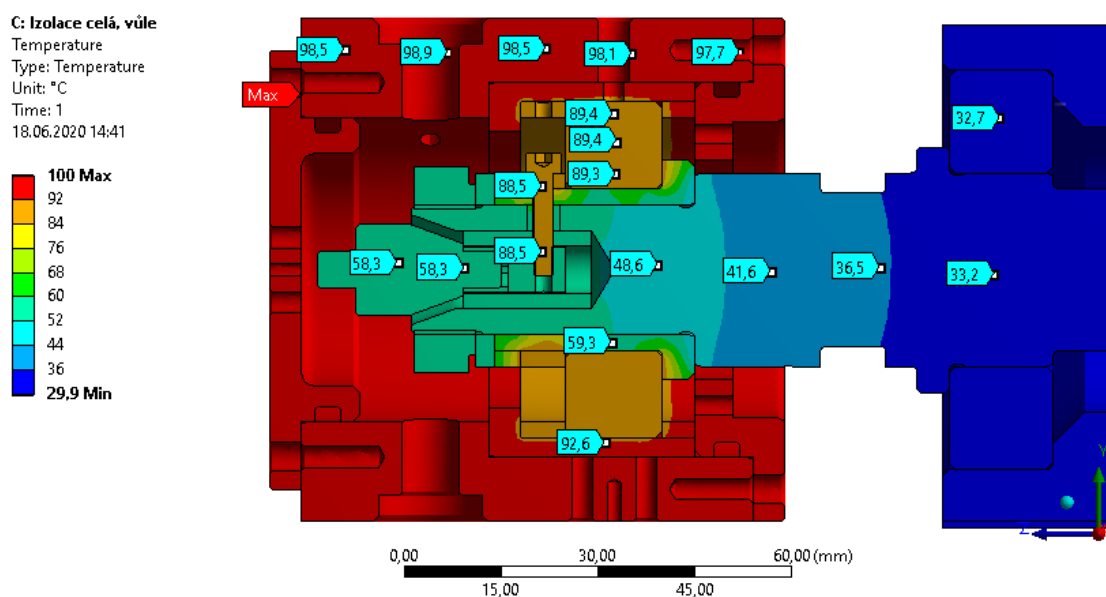
## Výsledky

Na Obr. 5-19 lze pozorovat domek testovaného ložiska, ložiskové těleso a hřídel. Na pravé části obrázku, v místě připojení motoru, je teplota hřídele asi 30 °C. Místa na hřídeli, kde jsou umístěna ložiska podpůrného domku, mají teploty 33 °C a 31 °C. Zmíněné teploty v místě připojení elektromotoru a v místě ložisek jsou dostatečně nízké a nemají vliv na správný chod zařízení.



Obr. 5-19 Ohřev celek (ANSYS Workbench)

Ověřením teploty v domku lze vidět, že hlavní zásluhu nízké teploty na hřídeli v místě uložení podpůrných ložisek ložiskového tělesa a v místě upnutí elektromotoru, mají elektrické izolační vložky z nylonu 6. Jak lze vidět na Obr. 5-20, teplota domku se pohybuje od 97 °C do 100 °C a místo na hřídeli, kde je zasazeno testované ložisko, má teplotu okolo 55 °C. To je asi o 42 °C teplotní pokles zapříčiněný právě zmíněnou elektrickou izolací z nylonu 6.



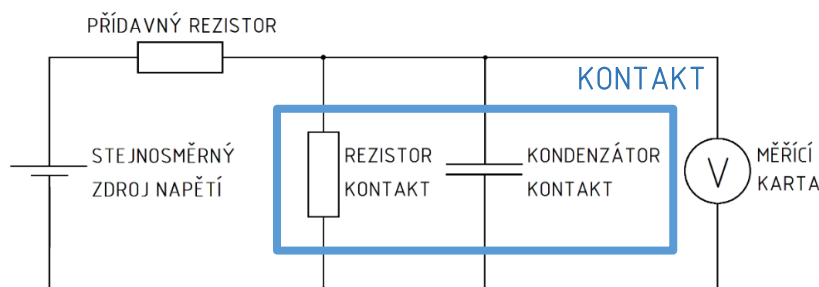
Obr. 5-20 Ohřev domek (ANSYS Workbench)

## 5.2 Měřicí řetězec

Kapitola popisuje měřicí řetězce, které jsou orientované na měření režimu mazání dle několika veličin. Pro zjištění režimu mazání je nejprve nutné definovat závislost mezi měřenou veličinou a režimem mazání. Charakter křivky udávající danou závislost je získán dle prvotních testů prováděných na tribometru *ball-on-disk*.

### 5.2.1 Obvod 1 (DC)

Jedná se o jednoduchý elektrický obvod se zdrojem stejnosměrného konstantního napětí (viz Obr. 5-21). Obvod je postaven pro určení průměrného odporu na kontaktu za určitý časový interval dle odporové měřicí metody (viz kap. 2.4.1). Pomocí daného obvodu je také možné měřit kapacitu kontaktu pomocí nabíjecí charakteristiky podobně jako u kapacitní měřicí metody (viz kap. 2.4.2). Odlišný je však děj, díky kterému dochází k nabíjení kontaktu. U kapacitní měřicí metody (viz kap. 2.4.2) je to následkem v čase definovaného napěťového skoku generovaného zdrojem. Oproti tomu je nabíjení v *obvodě 1* následkem časově náhodného vybití kontaktu způsobeného dotykem výstupků kontaktních ploch při konstantním napětí na zdroji.

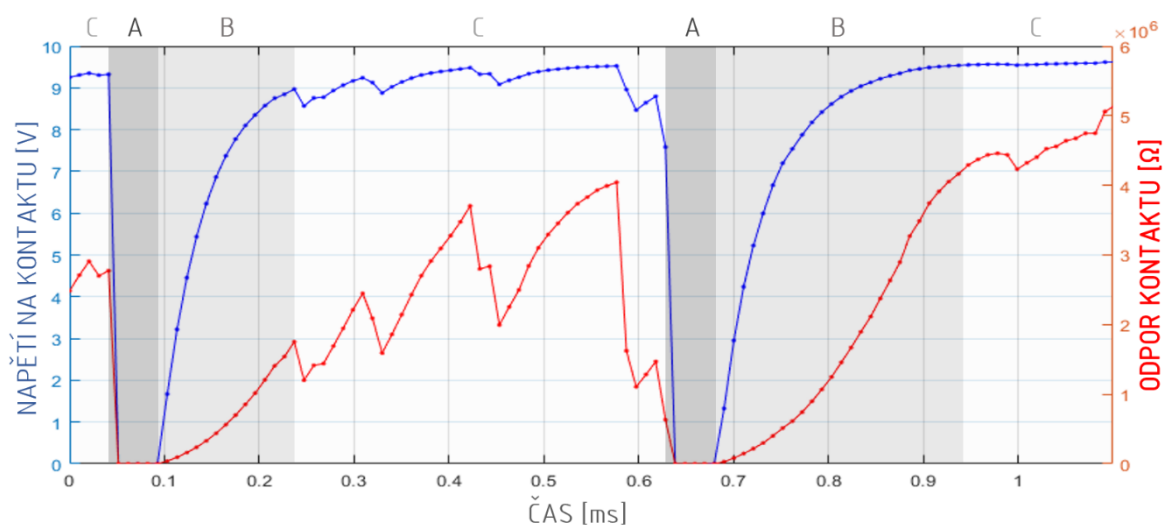


Obr. 5-21 Schéma - Obvod 1

Základ obvodu tvoří zdroj stejnosměrného (DC) konstantního napětí *Rigol DP 712*, k němuž jsou připojeny studované kontaktní oblasti *ball-on-disku* nebo ložiska. Studovaný kontakt má svůj odpor a kapacitu (viz Obr. 5-21). Odpor kontaktu je v obvodu symbolizován rezistorem (rezistor kontakt) a kapacita kondenzátorem (kondenzátor kontakt). *Rezistor kontakt* má odpor definovaný tloušťkou mazacího filmu a typem maziva. *Kondenzátor kontakt* reprezentuje dvojici kovových ploch, které jsou odděleny mazacím filmem. Kovové plochy jsou dle studovaného zařízení buď kulička a disk, nebo kuličky a kroužky ložiska. Do elektrického obvodu je také zapojen přídavný rezistor sloužící jednak jako regulátor toku elektrického proudu a taky jako pojistka proti přílišnému navýšení proudu. K měření aktuálního napětí kontaktu slouží v případě tribometru *ball-on-disk* měřicí karta *NI 6002*, a v případě testovacího zařízení s ložiskem měřicí karta *NI 9215*. Typ použité měřicí karty se odvíjí od její vzorkovací frekvence, která koresponduje s rychlostí valení kontaktních ploch.

## Měřené veličiny

V elektrickém obvodu je měřeno napětí na zdroji, které je následně přepočítáno na odpor kontaktu. K celkovému odporu v obvodu 1 přispívá *přídavný rezistor*, *rezistor kontakt* a *kondenzátor kontakt*. *Přídavný rezistor* a *rezistor kontakt* spolu tvoří takzvaný odporový napěťový dělič. Jedná se o používaný prvek obvodů, který rozděluje napětí ze zdroje na oba rezistory v poměru přímo úměrném velikosti jejich odporů. *Rezistor kontakt* může nabývat odporu od hodnot menších jak jednotek až do více jak miliónů ohmů. Pokud nastane dotyk výstupků kontaktních ploch, nabývá odpor kontaktu minima (viz Obr. 5-22 A), naopak při plném oddělení kontaktních ploch mazivem maxima (viz Obr. 5-22 C). K měřenému odporu kontaktu také přispívá *kondenzátor kontaktu* v době jeho nabíjení (viz Obr. 5-22 B). Odpor, který činí *kondenzátor kontakt*, je při začátku nabíjení minimální ( $\sim 0 \Omega$ ) a na jeho konci maximální ( $\sim \infty \Omega$ ).



Obr. 5-22 Ilustrační průběh měření na ložisku pomocí obvodu 1

V průběhu měření napětí (viz Obr. 5-22 modře) a odporu (viz Obr. 5-22 červeně) kontaktu lze rozeznávat tři charakteristické úseky, které se vzájemně střídají dle četnosti dotyků výstupků kontaktních ploch. Na Obr. 5-22 jsou úseky označeny písmeny A, B, C. Úsek A vypovídá o stálém elektrickém spojení kontaktních ploch, které se vyznačuje minimálním odporem a napětím na kontaktu. Na úseku B lze pozorovat nabíjení kontaktu (kondenzátor kontakt). Nabíjení nastává, pokud dojde po dotyku k oddělení kontaktních ploch a odpor kontaktu (rezistor kontakt) výrazně vzroste. V úseku C je pak kontakt (kondenzátor kontakt) plně nabitý a na obvod by v ideálním případě neměl mít vliv, neboť jeho hodnota odporu nabývá maxima ( $\sim \infty \Omega$ ). Napětí v obvodu se poté přímou úměrou rozdělí dle velikostí odporů *přídavného rezistoru* a *rezistoru kontaktu*. Avšak i v tomto úseku je možné pozorovat poklesy odporu kontaktu (rezistor kontakt) a jeho opětovný nárůst doprovázený nabíjecí charakteristikou.

## Metody měření

Obvod 1 je primárně určen pro měření napětí na kontaktu, z kterého lze dopočítat jeho průměrný odpor. Ten je dán měřenými úseky A, B, C popsanými výše. Na obvodu je také možné měřit kapacitu kontaktu pomocí napětí dle nabíjecí charakteristiky (viz Obr. 5-22 B). Obě získané veličiny, a to jak průměrný odpor, tak kapacita lze využít pro určení režimu mazání.

### 1. Určení režimu mazání dle průměrného odporu kontaktu

Pro zjištění odporu se měří napětí na kontaktu. Ze zjištěného napětí za určitý časový úsek se vytvoří průměrná hodnota napětí, která je následně přepočítána na průměrný odpor kontaktu. Aby bylo možné určit dle odporu kontaktu režim mazání, je nejprve nutné naměřit soubor dat z celé škály měřeného režimu mazání. Tato data slouží k definování závislosti mezi režimem mazání a průměrným odporem kontaktu. Díky této závislosti je následně možné zjistit režim mazání z průměrného odporu kontaktu. Daná závislost se pro každý typ kontaktu (typ ložiska) liší.

Pro měření je důležité vhodně zvolit veličiny určitých prvků obvodu. Velikost přídavného rezistoru by měla být volena s přihlédnutím na vzorkování měřicí karty a kapacity kontaktu. Nabíjecí charakteristika kontaktu (viz Obr. 5-22 B) je závislá na proudu v obvodu a kapacitě kontaktu. Kapacita je měřená veličina a nelze jí řídit, avšak proud v obvodu lze ovládat velikostí odporu *přídavného rezistoru*. Pro měření je vhodné volit velikost jeho odporu tak, aby byla nabíjecí křivka zaznamenána měřicí kartou dostatečným množstvím bodů (alespoň dvaceti body). Pokud by byla zaznamenána příliš málo body, mohlo by dojít k nezaznamenání charakteristiky a dotyk kontaktních ploch by nemusel být započítán do měření.

### 2. Určení režimu mazání dle kapacity kontaktu

K určení kapacity kontaktu je nutné získat nabíjecí charakteristiku z měřeného napětí. Dle dvou zaznamenaných bodů nabíjecí charakteristiky je poté možné dopočítat kapacitu kontaktu pomocí rovnice nabíjení udávající závislost napětí kontaktu na čase:

$$U_k = U_0 \cdot \frac{R_k}{R_k + R_1} \cdot \left( 1 - \exp \left( \frac{-t}{\frac{c_k \cdot R_1 \cdot R_k}{R_1 + R_k}} \right) \right), [V] \quad (26)$$

kde  $U_k$  je napětí na kontaktu ve V,  $U_0$  je napětí zdroje ve V,  $R_k$  je odpor kontaktu v  $\Omega$ ,  $c_k$  je kapacita kontaktu ve F,  $R_1$  je odpor přídavného rezistoru v  $\Omega$ ,  $t$  je čas v s.

Pro určení režimu mazání je stejně jako u měření dle odporu nejprve nutné naměřit soubor dat, který v tomto případě slouží k definování závislosti mezi tloušťkou maziva a kapacitou kontaktu. Režim mazání se následně dopočítá dle naměřených drsností kontaktních ploch.

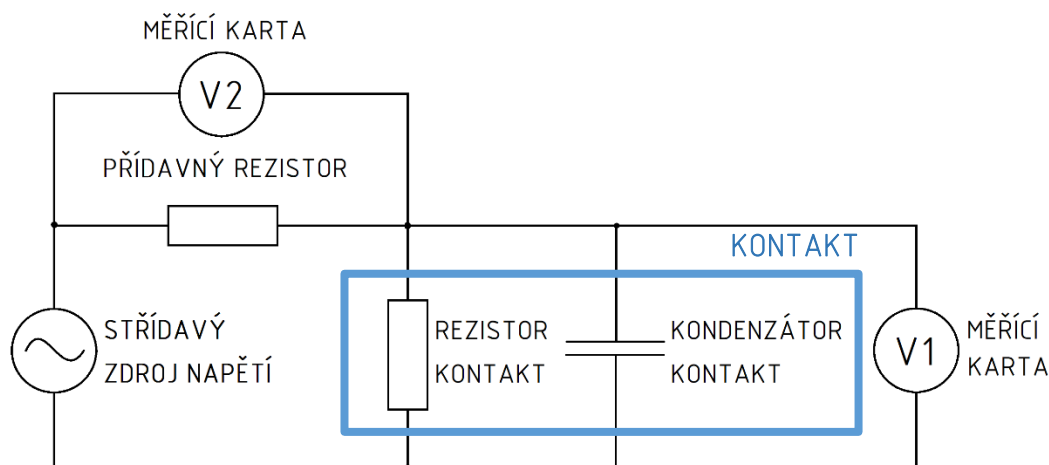


Přídavný rezistor musí být zvolen tak, aby spolu s vzorkovací frekvencí měřicí karty umožňoval změřit nabíjecí charakteristiku dostatečným množstvím bodů (alespoň dvaceti body) tak, jak tomu je u měření dle průměrného odporu.

Měření lze však vykonávat jen v ohraničené oblasti frekvencí dotyků kontaktních ploch. Pokud doba mezi dotyky bude příliš malá, měření nebude možné kvůli nedosažitelné vzorkovací frekvenci měřicí karty, která se bude blížit nekonečnu. Naopak pokud doba bez dotyků bude příliš velká, nebude docházet k tvorbě nabíjecích křivek, které lze měřit a měření nebude dostatečně kontinuální. Z toho vyplývá, že je měření možné jen v určité oblasti dle režimu mazání (smíšené mazání).

### 5.2.2 Obvod 2 (AC)

Jde o obvod určený pro měření kapacity (viz Obr. 5-23) dle kapacitní měřicí metody (viz kap. 2.4.2). Kromě měření kapacity lze monitorovat i dotyk kontaktních ploch, kdy dochází k vybití kontaktu podobně jako u odporové metody, viz *obvod 1*. Aby se projevil kapacitní parametry kontaktu je do obvodu zapojen zdroj harmonického střídavého napětí (AC). Měřicí karta měří napětí na kontaktu a napětí na *přídavném rezistoru*. Měřené napětí na přídavném rezistoru je přepočítáváno na proud, který protéká obvodem.



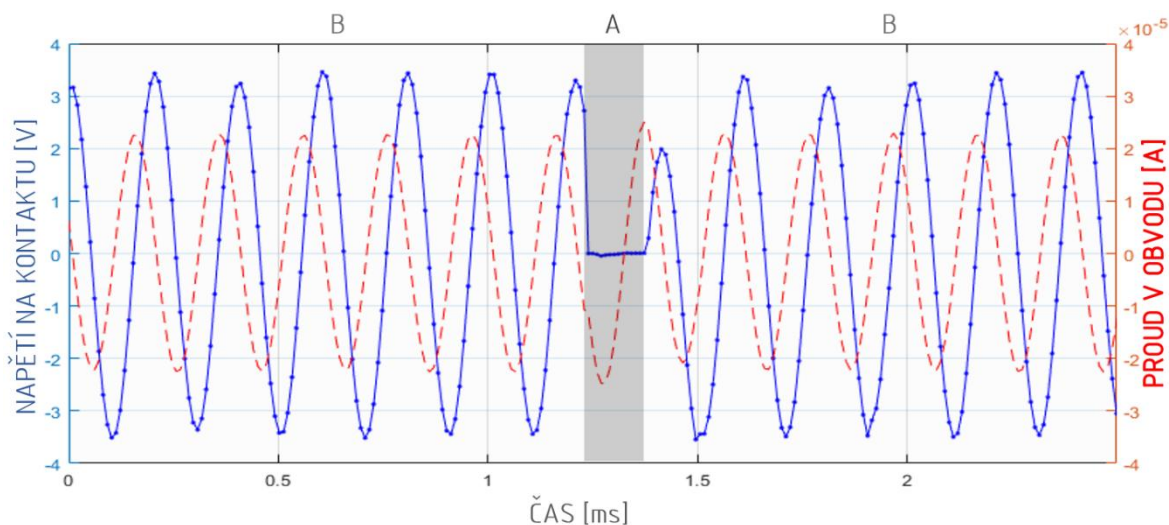
Obr. 5-23 Schéma - Obvod 2

Napájení obvodu je tvořeno zdrojem harmonicky střídavého napětí *HP 33120A*. Studovaný kontakt je stejně jako v *obvodu 1* symbolizován rezistorem (rezistor kontakt) a kondenzátorem (rezistor kontakt). *Rezistor kontakt* má odpor definovaný tloušťkou mazacího filmu a typem maziva. *Kondenzátor kontakt* reprezentuje dvojici kovových ploch dle studovaných kontaktů, které jsou oddělené mazacím filmem. *Přídavný rezistor* v obvodu slouží k přepočtu napětí na něm na proud tekoucí obvodem. Měření aktuálního napětí jak na přídavném rezistoru, tak na kontaktu zajišťuje v případě tribometru *ball-on-disk* měřicí karta *NI 6002*, a v případě testovacího zařízení s ložiskem měřicí karta *NI 9215*. Typ použité měřicí karty se odvíjí od její vzorkovací frekvence, která souvisí s rychlostí valení kontaktních ploch.



## Měřené veličiny

V elektrickém obvodu je měřeno napětí na kontaktu a na *přídavném rezistoru*, z kterého je napětí přepočítáno pomocí Ohmova zákona na proud tekoucí obvodem. Z amplitud proudu a napětí na kontaktu je poté vypočítána kapacita.



Obr. 5-24 Ilustrační průběh měření na ložisku pomocí obvodu 2

Průběh měření lze pozorovat na Obr. 5-24., kde je vyobrazeno napětí na kontaktu (viz Obr. 5-24 modře) a proud tekoucí kontakt (viz Obr. 5-24 červeně). Samotný průběh lze rozdělit na dva charakteristické úseky označené písmeny A, B, jež lze vidět na Obr. 5-24. Úsek A ukazuje stálý kontakt výstupků kontaktních ploch. *Kondenzátor kontakt* do veličin obvodu nezasahuje a napětí s odporem kontaktu je minimální ( $\sim 0 \Omega$ ). V úseku B je vidět harmonický signál napětí. Amplitudy napětí nemají stejnou hodnotu, ale mírně se liší. Tyto odlišnosti jsou většinou způsobeny kolísáním odporu kontaktu.

## Metody měření

Obvod 2 je zejména určen pro měření kapacity kontaktu. Pomocí obvodu je možné také monitorovat dotyky kontaktních ploch (viz Obr. 5-24 A), které se vyznačují minimálním napětím na kontaktu. Díky oběma zmíněným veličinám se dá určit režim mazání.

### 1. Určení režimu mazání dle kapacity kontaktu

K určení režimu mazání dle kapacity je nejprve nutné naměřit soubor dat z celé škály měření a pomocí něj poté definovat závislost mezi kapacitou a tloušťkou maziva. Tloušťka mazací vrstvy je poté přepočítána podle naměřených drsností kontaktních ploch na parametr mazání. Kapacitu lze spočítat s kapacitance, což je veličina, kterou je možné pospat *kondenzátor kontakt* v obvodu se střídavým harmonickým zdrojem napětí. Kapacitance je imaginární částí impedance, která udává poměr mezi amplitudou napětí a proudem na kondenzátoru.

Kapacitance je popisována rovnicí (27). Pokud je známá frekvence střídavého harmonického napětí na kondenzátoru, je možné dopočítat z kapacitance kapacitu pomocí rovnice (28). Propojením obou rovnic lze získat rovnice pro kapacitu v obecném tvaru (29). Po úpravě této rovnice podle konkrétního obvodu je získána rovnice pro výpočet kapacity (30).

$$X_C = U_m / I_m, [\Omega] \quad (27)$$

$$C_k = 1 / (X_C \cdot 2 \cdot \pi \cdot f), [F] \quad (28)$$

$$C_k = I_m / (U_m \cdot 2 \cdot \pi \cdot f), [F] \quad (29)$$

$$C_k = U_{1m} / (U_m \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_l), [F] \quad (30)$$

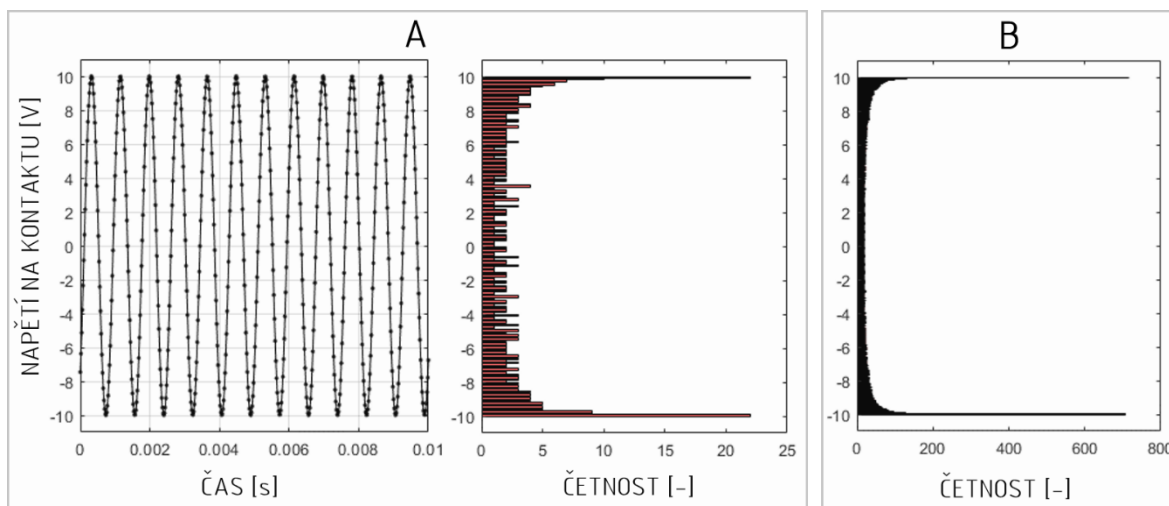
kde  $X_C$  je kapacitance kontaktu v  $\Omega$ ,  $C_k$  je kapacita kontaktu ve F,  $I_c$  je amplituda proudu v obvodu v A,  $U_m$  je amplituda napětí na kontaktu ve V,  $U_{1m}$  je amplituda napětí na *přídavném rezistoru* ve V,  $f$  je frekvence zdroje v Hz a  $R_l$  je přídavný odpor v  $\Omega$ .

#### 5.2.2.1 Určení amplitudy napětí kontaktu a přídavného rezistoru

Amplitudu napětí na kontaktu a na *přídavném rezistoru* nutnou pro zjištění kapacity lze z naměřeného signálu zjistit více způsoby.

Nejjednodušší způsob je vizuální odečtení maximálních a minimálních hodnot z vykresleného grafu. Při nutnosti analýzy většího množství dat je ale tento postup neúnosně pracný. Pro zjištění amplitudy z většího množství dat je také možné odečítat amplitudy jen jednou za zvolenou periodu. V tomto případě se odečítá amplituda napětí za delší čas měřeného signálu, avšak vyhodnocení pouze z vybraných dat nemusí odpovídat celému měřenému signálu.

Dalším způsobem, jak zjistit amplitudu signálu, je vytvoření histogramu z naměřených dat za určitý časový úsek (distribuce dat zařazena do intervalů v kterých je určována četnost). Amplituda je v histogramu napětím s největší četností dat. To je způsobeno tím, že měřicí karta zaznamená nejvíce bodů právě v místech, kde je změna napětí v signálu nejmenší, a to je právě v maximech a minimech měřeného signálu. Na Obr. 5-25 lze vidět dva ilustrační histogramy.



Obr. 5-25 Ilustrační distribuce dat zařazena do intervalů a určena četnost (Histogram)

Na Obr. 5-25 A lze vidět průměr napětí od -10 do 10 V o frekvenci 1200 Hz za dobu měření 0,01 s, měřeno se vzorkovací frekvencí 50 kHz. Tento signál je začleněný do intervalu v histogramu, z kterého je možné s přesností na jeden dílek histogramu 0,1 V určit hodnotu s maximální četností neboli amplitudu napětí. Ve střední oblasti napětí histogramu A lze pozorovat dosti kolísavý průběh četnosti, což je způsobeno zpracovaným nízkým množstvím dat. Hladší průběh histogramu se znatelnějšími maximy se dá pozorovat na Obr. 5-25 B, kdy byla změněna pouze doba měření na 1 s a interval histogramu zmenšen na 0,01 V. Avšak pokud je měřený harmonický signál hodně poškozen kvůli dotykům kontaktních ploch, není v histogramu amplituda dostatečně čitelná a jeho rozložení více odpovídá normálnímu rozdělení se znatelným vzrůstem četnosti v oblasti nuly. Tato četnost může vypovídat o dotycích kontaktních ploch, viz druhý typ měření dle tohoto obvodu. Data jsou vyhodnocována za určitý časový úsek, a proto amplituda odpovídá právě tomuto úseku

U obou přechozích způsobů není měření zcela kontinuální. Pokud je nutné zjišťovat amplitudu v reálném čase s vysokou frekvencí blíží se frekvenci měřicí karty, je možné použít soustavu dvou rovnic, kde vstupují dvě známé veličiny (dvě hodnoty měřeného napětí) a jsou vypočítány dvě neznámé veličiny (amplituda a posunutí měřeného signálu). Pro výpočet a definování rovnic je použit program *MATLAB* a funkce *syms* s funkcí *vpasolve*. Funkce *syms* umožňuje definovat soustavu rovnic a neznámých, které jsou poté pomocí funkce *vpasolve* numericky vypočítány. Pro výpočet byly definovány dvě stejné rovnice:

$$U_k = U_m \cdot \sin((t \cdot 2\pi \cdot f) - (t_0 \cdot 2 \cdot f / \pi)), [V] \quad (31)$$

kde  $U_k$  je aktuální napětí ve V,  $U_m$  je amplituda napětí ve V,  $t$  je aktuální čas v s,  $f$  je frekvence zdroje harmonického napětí v Hz,  $t_0$  je počáteční posunutí signálu v čase v s.

Do výpočtu vstupovaly vždy dvojice aktuálního napětí, dva jejich časy a frekvence zdroje. Vypočítána byla amplituda a počáteční posunutí signálu. Amplitudu je tak možné zjišťovat v celém měřeném čase s dvojnásobnou periodou k periodě měřicí karty. Jelikož měřený signál je ovlivňován dotykem kontaktních ploch a také i menšími výchyly odporu kontaktu, je nutné výslednou amplitudu filtrovat.

Výsledné hodnoty amplitud byly zprůměrovány pomocí plovoucího průměru s odstraněním extrémních výchylek. Filtrace byla vytvořena pomocí skriptu v programu *MATLAB*. Upravené hodnoty amplitud jsou poté přepočítány pomocí vzorce (30) na kapacitu.

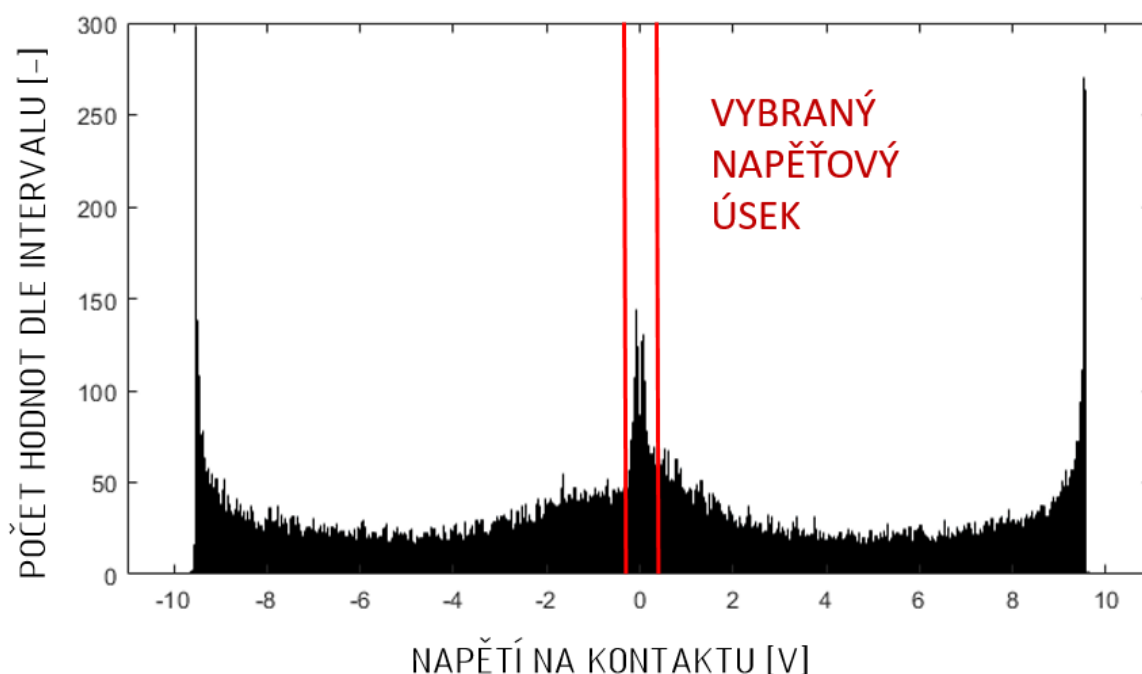
#### 5.2.2.2 Podmínky pro měření

Frekvenci měřicí karty je také nutné volit tak, aby jedna perioda harmonického napětíového signálu ze zdroje byla zaznamenána dostatečným množstvím bodů. Pokud by bylo bodů málo, mohl by vznikat jev zvaný „aliasing“. Měření je také ohraničeno minimální dobou mezi dotyky kontaktních ploch. Pokud bude doba příliš malá, nebude možné naměřit hodnoty napětí, které by vypovídaly o tloušťce mazací vrstvy.

Kapacity kontaktu jsou ovlivněny kapacitami od dalších prvků elektrického obvodu (elektrická kabeláž, kostry zařízení a další), a proto je nutné při začátku měření tyto nežádoucí kapacity zjistit, aby mohly být od měřené kapacity odečteny. Pro měření nežádoucích kapacit se do elektrického obvodu namísto měřeného kontaktu zapojí kondenzátor o známé kapacitě. Poté se určí rozdíl mezi naměřenou hodnotou kapacity a známou hodnotou kapacity připojeného kondenzátoru, který se bude následně od výsledné kapacity odečítat. Na připojený kondenzátor o známé kapacitě jsou kladeny vysoké nároky na jeho přesnost, neboť přesností kondenzátoru jsou poté postihnuty výsledky.

## 2. Určení režimu mazání dle četnosti dotyků kontaktních ploch

Pro určení režimu mazání lze také použít informaci o dotycích kontaktních ploch, kterou je možné získat z náhlého poklesu napětí v měřeném signálu (viz Obr. 5-24 A). Pokles napětí nastává v případě dotyku kontaktních ploch. Dle množství hodnot v definovaném intervalu napětí okolo nulové hodnoty za určitý čas lze získat informaci o četnosti dotyků kontaktních ploch. Definovaný interval je vidět na ilustračním histogramu na Obr. 5-26 s reálného měření na tribometru *ball-on-disk* za dobu 1 s měření. Na histogramu se dá také pozorovat ztlačná maxima, minima množství hodnot napětí v amplitudách signálu a také vzrůst množství hodnot napětí právě okolo nulové hodnoty napětí. Pro měření režimu mazání je nutné nejprve definovat závislost mezi množstvím hodnot v intervalu napětí za časový úsek k režimu mazání. Závislost je vhodné definovat prvotním měřením souboru dat. Pro zjištění množství hodnot v definovaném intervalu napětí lze použít histogram, z kterého je možnost hodnoty odečíst.



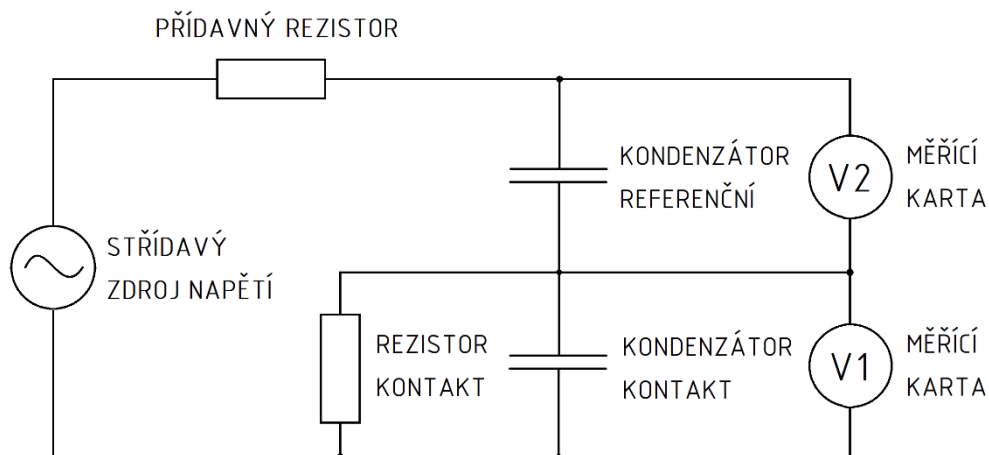
Obr. 5-26 Ilustrační histogram s výběrem úseku pro měření

Při sčítání hodnot napětí v definovaném intervalu je kromě hodnot blízkých se nulové velikosti napětí dané dotykem výstupků kontaktních ploch také započítán harmonický průběh signálu v době, kdy se mění znaménko napětí.

Pro měření je důležité vhodně zvolit interval okolo nulové hodnoty napětí, z kterého se bude počítat množství hodnot pro měření.

### 5.2.3 Obvod 3 (AC)

Obvod vychází ze studie [21], kde nese označení *SKF Lubcheck*. Obvod (viz Obr. 5-27) slouží k měření kapacity kontaktu dle kapacitní měřicí metody (viz kap. 2.4.2). Obvod je napájen zdrojem harmonického střídavého napětí (AC). Měřicí karta měří napětí na *referenčním kondenzátoru* a na kontaktu.



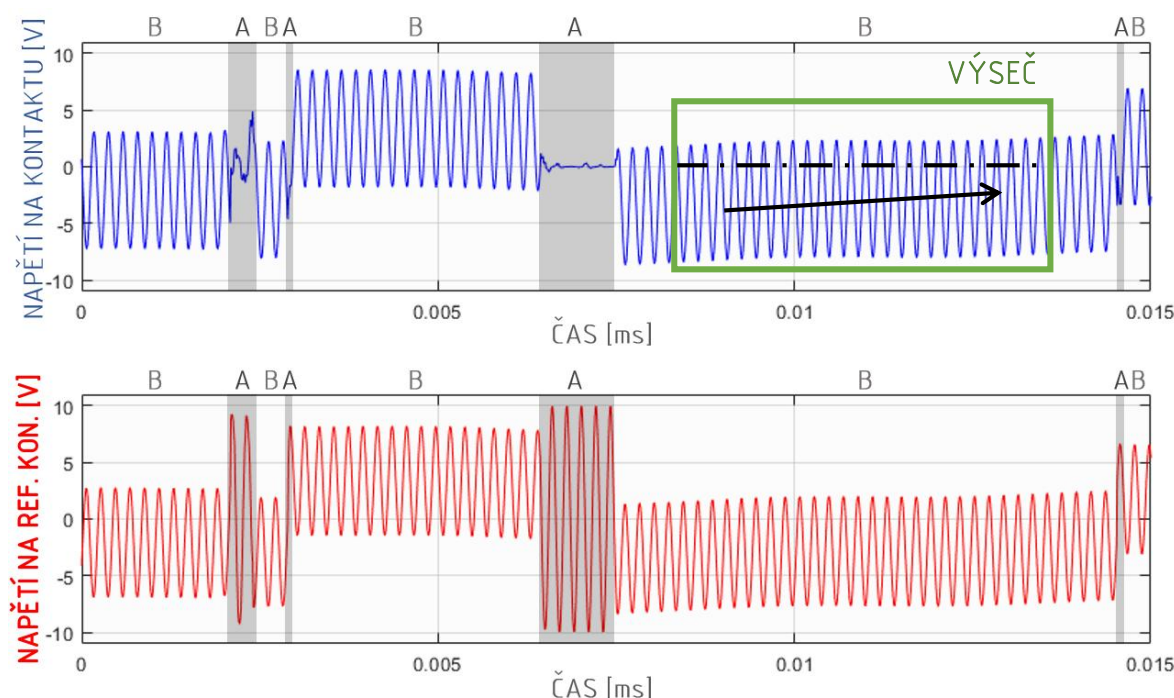
Obr. 5-27 Obvod 3

Obvod tvoří zdroj střídavého harmonického napětí *HP 33120A*. Studovaný kontakt je symbolizován rezistorem (rezistor kontakt) a kondenzátorem (kondenzátor kontakt). *Rezistor kontakt* má odpor definovaný tloušťkou mazacího filmu a typem maziva. *Kondenzátor kontakt* reprezentuje dvojici kovových ploch dle studovaných kontaktů, které jsou oddělené mazacím filmem. *Referenční kondenzátor* je kondenzátor o známé kapacitě, který slouží k vyčíslení kapacity kontaktu tím, že spolu s *kondenzátorem kontaktu* vytváří takzvaný kapacitní dělič. *Přídavný rezistor* slouží k redukci proudu v obvodu. Měření aktuálního napětí jak na přídavném rezistoru, tak na kontaktu zajišťuje v případě tribometru *ball-on-disk* měřicí karta *NI 6002* a v případě testovacího zařízení s ložiskem měřicí karta *NI 9215*.

## Měřené veličiny

Obvod je sestaven pro měření kapacity kontaktu. K vyčíslení kapacity je měřeno napětí na kontaktu a na *referenčním kondenzátoru*. Měření využívá dvou kondenzátorů v obvodu, které vytvářejí takzvaný kapacitní napěťový dělič. Jedná se o prvek, který rozděluje napětí na *kondenzátor kontakt* a *referenční kondenzátor* nepřímo úměrně k velikostem jejich kapacit.

Průběh měření lze pozorovat na Obr. 5-28, kde je vidět napětí na kontaktu (viz Obr. 5-28 nahoře) a napětí na referenčním kondenzátoru (viz Obr. 5-28 dole).



Obr. 5-28 Ilustrační průběh měření na tribometru pomocí obvodu 3

Průběh měření je na Obr. 5-28 rozdělen dvěma úseky, které jsou označeny písmeny A, B. V úseku A dochází k dotykům výstupků kontaktních ploch. Odpor na kontaktu je minimální ( $\sim 0 \Omega$ ), což se projeví nárůstem amplitudy napětí na *referenčním kondenzátoru* dle amplitudy zdroje. V úseku B jsou kontaktní plochy oddělené mazivem. Z Obr. 5-28 lze vidět, že střední napětí je u signálů posunutě mimo nulovou vodorovnou osu. Velikost a směr posunu je dána časem, kdy dojde k separaci kontaktních ploch. Střední napětí má kvůli odporu kontaktu (rezistor kontakt) tendenci se přibližovat k nule (viz Obr. 5-28 zelená výseč). S klesajícím odporem kontaktu (rezistor kontakt) se tato tendence zvětšuje.



## Metody měření

Obvod 3 slouží primárně k vyčíslení kapacity, avšak pomocí změny amplitudy na referenčním kondenzátoru (viz Obr. 5-28 A) či skokovým změnám napětí na mazaném kontaktu (viz Obr. 5-28 A) lze monitorovat dotyky kontaktních ploch.

### 1. Určení režimu mazání dle kapacity kontaktu

Změřením kapacity je možné tak jako u *obvodu 2* vypočítat režim mazání. Závislost mezi režimem mazání a kapacitou je předem určená dle prvotního měření. V obvodu je pro vyčíslení kapacity připojen spolu s měřeným kontaktem také *referenční kondenzátor*. *Kondenzátor kontakt* spolu s *referenčním kondenzátorem* vytváří takzvaný kapacitní dělič. Amplitudy napětí jsou rozděleny na obou kondenzátorech s nepřímou úměrností. Výpočet kapacity kontaktu je popsán rovnicí:

$$C_k = \frac{U_{mR} \cdot C_R}{U_{mk}}, [F] \quad (32)$$

kde  $U_{mR}$  je amplituda napětí na referenčním kondenzátoru o známé kapacitě ve V,  $C_R$  referenční kondenzátor o známé kapacitě v F a  $U_{mk}$  je amplituda napětí na kontaktu.

#### 5.2.3.1 Určení amplitudy napětí kontaktu a přidavného kondenzátoru

Stejně jako u *obvodu 2* (5.2.2) lze amplitudu zjišťovat vizuálně, nebo dle histogramu (kde musí být navíc oproti *obvodu 2* od měřeného signálu odečtena odchylka středního napětí od nulové vodorovné osy před užitím histogramu), anebo pomocí soustavy rovnic. Zjištění amplitudy pomocí soustavy rovnic se oproti *obvodu 2* liší rovnicemi a počtem známých a neznámých.

Pro výpočet soustavy rovnic lze jako u *obvodu 2* použít program *MATLAB* a funkce *syms* s funkcí *vpasolve*. Funkce *syms* umožňuje definovat soustavu rovnic a neznámých, které jsou poté pomocí funkce *vpasolve* numericky vypočítány. Pro výpočet byly definovány namísto dvou, jak je tomu u *obvodu 2*, tři stejné rovnice:

$$U_k = U_m \cdot \sin((t \cdot 2\pi \cdot f) - (t_0 \cdot 2 \cdot f/\pi)) + U_0, [V] \quad (33)$$

kde  $U_k$  je aktuální napětí ve V,  $U_m$  je amplituda napětí ve V,  $t$  je aktuální čas v s,  $f$  je frekvence zdroje harmonického napětí v Hz,  $t_0$  je počáteční posunutí signálu v čase v s a  $U_0$  je celkové posunutí napětí signálu ve V.



Do výpočtu vstupovaly trojce aktuálního napětí, tři jejich časy a frekvence zdroje. Vypočítána byla amplituda, počáteční posunutí signálu v čase a celkové posunutí napětí signálu. Amplitudu je tak možné zjišťovat v celém měřeném čase s trojnásobně menší periodou k periodě měřicí karty. Kvůli ovlivnění měřeného signálu dotykem kontaktních ploch a také i menšími výchylkami odporu kontaktu je vhodné výslednou amplitudu filtrovat.

Pro filtraci lze použít stejně jako u *obvodu 2* plovoucí průměrování s odstraněním extrémních výchylek. K filtraci je možné použít program MATLAB. Upravené hodnoty amplitud jsou poté přepočítány pomocí vzorce (25) na kapacitu.

## **2. Určení režimu mazání dle četnosti dotyků kontaktních ploch**

Určení režimu mazání dle četnosti dotyků kontaktních ploch u *obvodu 3* je zaměřen na posunutí středního napětí signálu (viz Obr. 5-28 B), které je následkem kovového kontaktu. Dle četnosti výrazných změn středního napětí signálu lze získat informaci o režimu mazání. Přesnost samotného měření je ovšem již v základu postihnuta chybou, neboť pokud doba mezi kovovými kontakty odpovídá periodě harmonického napětí zdroje, žádná změna střední hodnoty se neprojeví a dotyk není zaznamenán v měření. Toto měření již nyní nelze dále doporučit a nebude s ním uvažováno.

## 5.3 Prvotní testy na tribometru ball-on-disk

Prvotní testy byly prováděny na tribometru *ball-on-disk*. Před samotným měřením se provedlo ověření veličin v programu *MATLAB Simulink Electrical*. Nastavené veličiny obvodu a veličiny tribometru jsou vepsány v tab. 5-3.

tab. 5-3 Veličiny měření na tribometru ball-on-disk

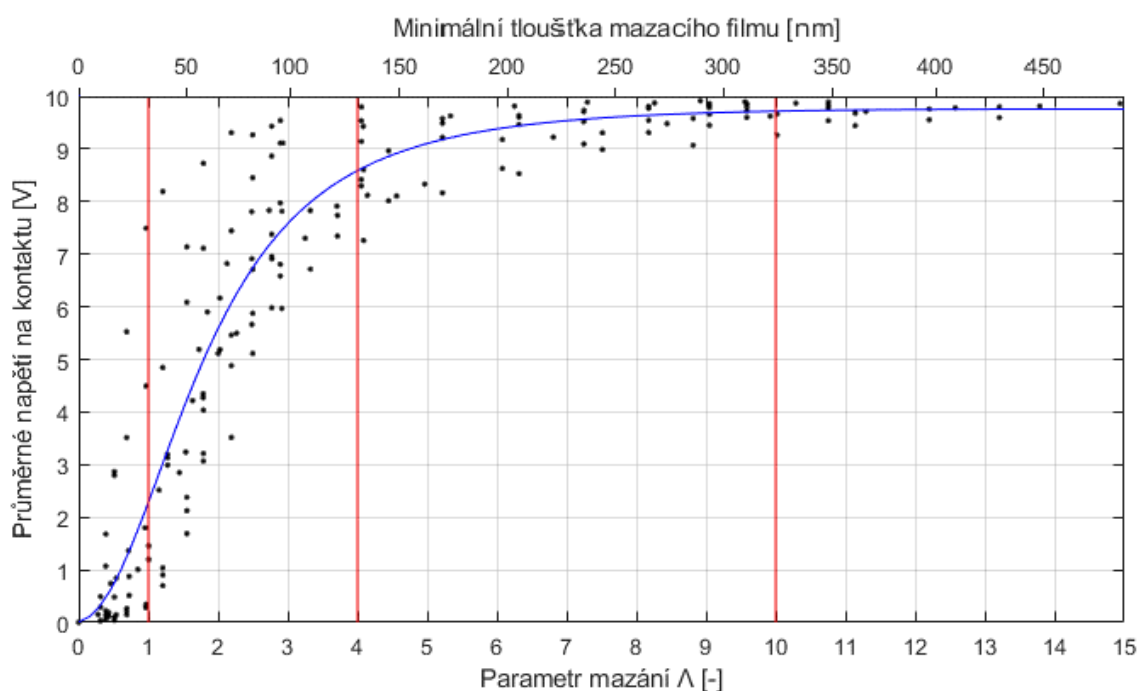
Elektrické veličiny obvodů			
název obvodu	obvod 1	obvod 2	obvod 3
typ zdroje	stejnoseměrný napěťový	střídavý harmonický	střídavý harmonický
napětí na zdroji	10 V	10 V	10 V
frekvence zdroje	-	1200 Hz	1200 Hz
přídavný odpor	2 MΩ	400 kΩ	1 kΩ
referenční kondenzátor	-	-	100 pF
Veličiny při testování na tribometru			
použité zařízení	tribometr <i>ball-on-disk</i>		
rozsah tečná rychlost valení	0,01–0,5 m/s		
rozsah tloušťky mazacího filmu	20–600 nm		
rozsah parametru mazání Λ	0,2–15		
zatížení na tribometru	64 N		
použitý olej	FVA 3 (ISO VG 100, minerální, parafínový, základový)		
materiály účastnící se kontaktu	chromová vrstva / ocel		
drsnost kuličky a disku	0,032 a 0,005 μm		
Dosahované veličiny měřeného kontaktu na tribometru ball-on-disk			
odpor kontaktu (rezistor kontakt)	~800 MΩ		
kapacita kontaktu (kondenzátor kontakt)	30–50 pF		
rozsah četnosti dotyků kontaktních ploch	10 <sup>2</sup> –10 <sup>6</sup> Hz		
frekvence vzorkování karty NI 6002	1 kanál - 50 kHz, 2 kanály - 25 kHz		

### 5.3.1 Výsledky z měření na tribometru dle metod udávajících informaci o kovovém dotyku

Měření dle odporové měřicí metody na obvodu 1

Na tribometru *ball-on-disk* s *kolorimetrickou interferometrií* a *obvodem 1* bylo nejprve změřeno průměrné napětí na kontaktu za 1 s při vzorkování měřicí karty 20 kHz vůči minimální tloušťce mazacího filmu (viz Obr. 5-29 horní osa). Tato závislost je následně přepočítána na průměrné napětí k režimu mazání (viz Obr. 5-29 dolní osa) a také k průměrnému odporu k režimu mazání (viz Obr. 5-30). Závislost průměrného napětí na režimu mazání je následně použita pro proložení funkcí. Daná funkce (34) slouží jako základ pro měření režimu mazání z průměrného napětí na kontaktu dle *obvodu 1*. Poté je srovnán režim mazání určený dle *obvodu 1* vůči ověřenému režimu mazání vypočítanému z minimální tloušťky maziva, která byla změřena pomocí *kolorimetrické interferometrie* (viz Obr. 5-33). Nakonec je zhodnocena přesnost měření a doporučeny oblasti dle parametru mazání pro měření.

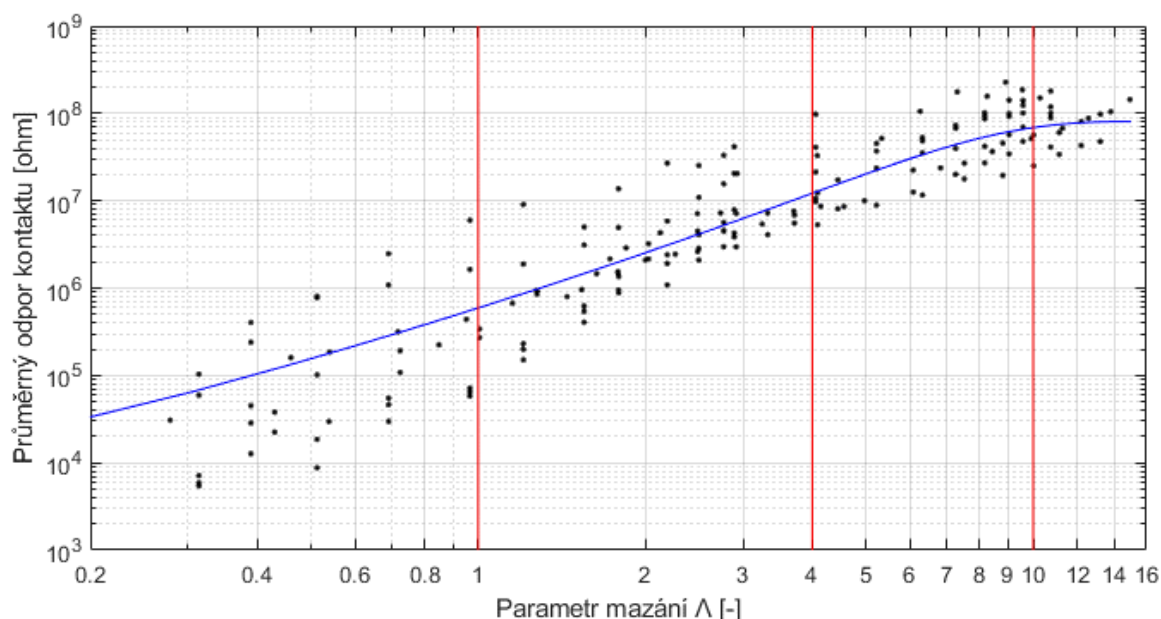
Na Obr. 5-29 horní osa je vidět průměrné napětí v závislosti na minimální tloušťce mazacího filmu.



Obr. 5-29 Graf minimální tloušťky maziva / parametru mazání k průměrnému napětí na kontaktu

Minimální tloušťka mazacího filmu byla následně přepočítána na parametr mazání. Parametr mazání vůči průměrnému napětí na kontaktu lze pozorovat na Obr. 5-29 (spodní osa).

Na Obr. 5-30 je vidět průměrný odpor kontaktu vypočítaný z průměrného napětí v závislosti k parametru mazání.



Obr. 5-30 Graf parametru mazání k průměrnému odporu kontaktu

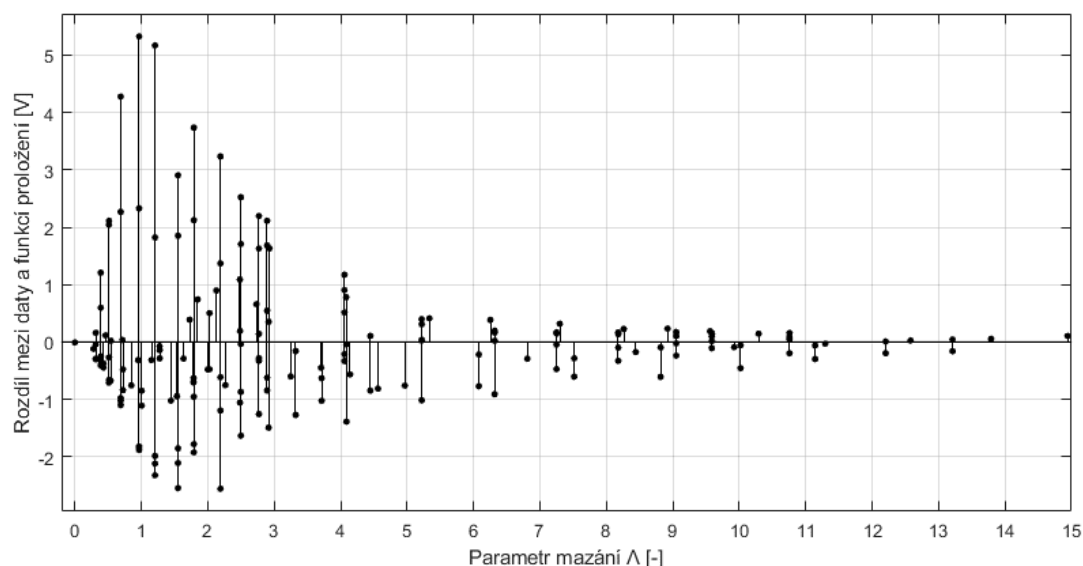
Pro účely vyhodnocení musela být data proložena funkcí. K výběru funkce byl použit koeficient determinace, který udává kvalitu proložení dat pro budoucí predikci závislé hodnoty. Na základě proložení dat různými funkcemi, u kterých byl koeficient determinace porovnáván, byla vybrána racionální funkce. Jedná se o funkci složenou z podílu dvou mnohočlenů.

Použitá racionální funkce má tři členy v čitateli a ve jmenovateli. Její koeficient determinace je 95,93 %, což lze posoudit jako dostatečně kvalitní. Funkce je dána rovnicí:

$$U(\Lambda) = \frac{p1 \cdot \Lambda^2 + p2 \cdot \Lambda + p3}{\Lambda^2 + q1 \cdot \Lambda + g2} \quad (34)$$

kde jsou parametry  $p1 = 9,566$ ,  $p2 = 1,212$ ,  $p3 = 0,04068$ ,  $q1 = -0,4493$ ,  $q2 = 4,187$ ,  $U(\Lambda)$  je napětí na kontaktu ve V a  $\Lambda$  je parametr mazání.

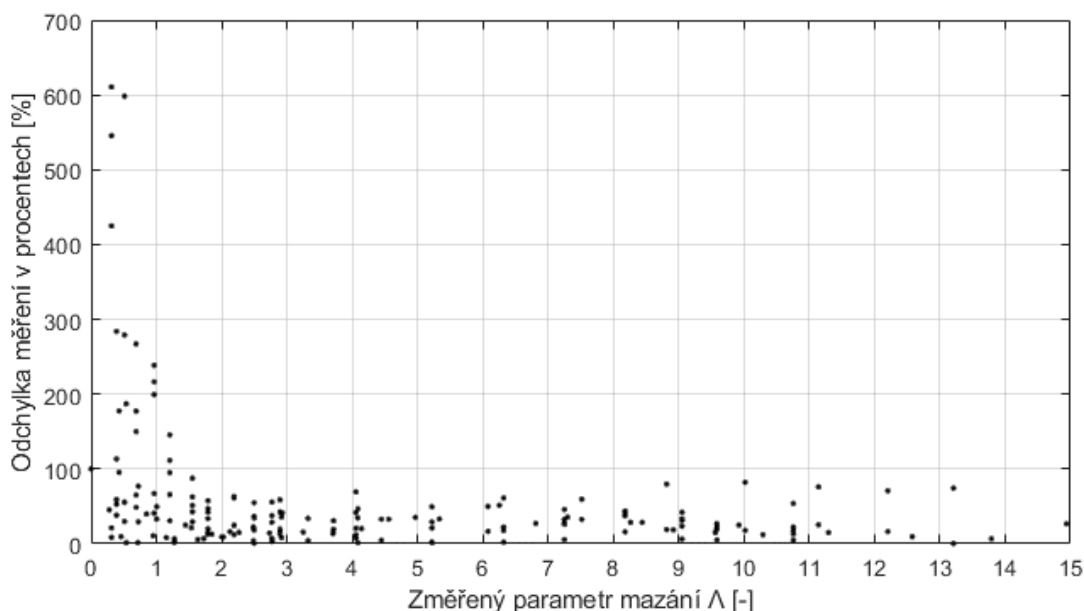
Odchylky napětí od proložené funkce a prokládaných dat je možné vidět na Obr. 5-31. Odchylky v proložení jsou větší v oblasti od parametru mazání 4 a níže. Tyto odchylky způsobují strmý sklon prokládané funkce a data, která jsou v tomto úseku více rozptýlená.



Obr. 5-31 Graf odchylky v napětí mezi daty a proloženou funkcí

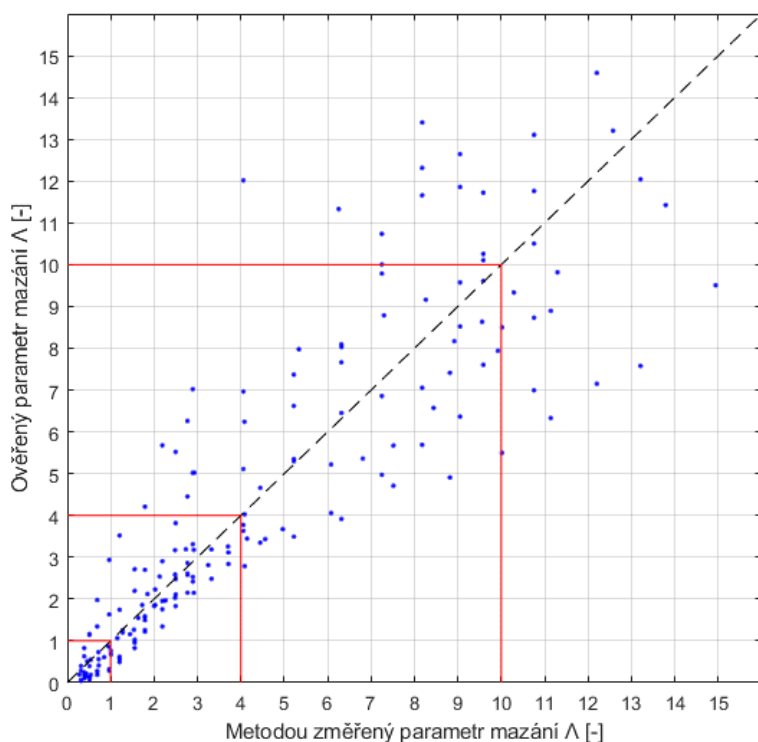
Dle proložené funkce je nakonec vypočítán režim mazání z naměřeného průměrného napětí. Jedná se o způsob, jakým jsou dle *obvodu 1* vyhodnocovány kontakty dle průměrného odporu, avšak v tomto případě bylo kvůli snazšímu proložení dat funkcí použito průměrné napětí. A to proto, že nese rovnocennou informaci o dotycích jako průměrný odpor, který je dle průměrného napětí vypočítán.

Změřený režim mazání dle *obvodu 1* je následně srovnán s ověřeným režimem mazání, který byl vypočítán z minimální tloušťky mazacího filmu, jež byla naměřena *kolorimetrickou interferometrií*. Procentuální odchylky v měření lze vidět na Obr. 5-32



Obr. 5-32 Odchylky v měření obvod 1 četnost dotyků

Celkové porovnání ověřeného režimu mazání od změřeného pomocí *obvodu 1* lze vidět na Obr. 5-33.



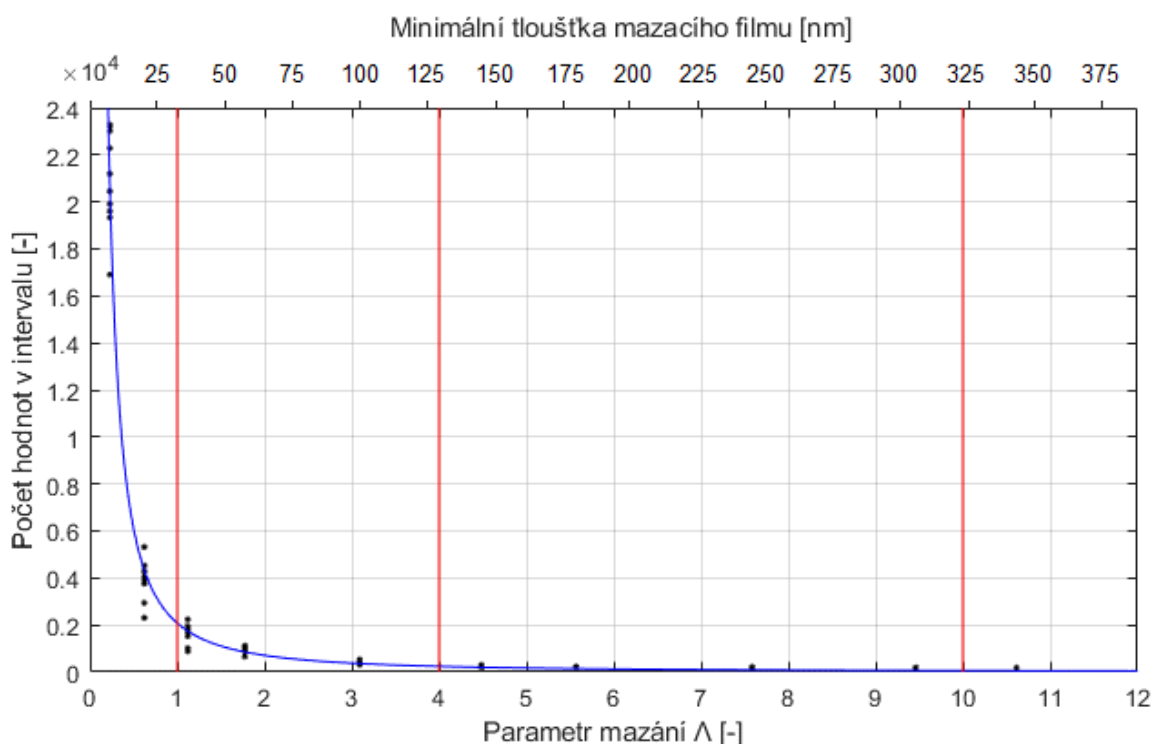
Obr. 5-33 Graf měřeného k ověřenému parametru mazání – Obvod 1

Ze srovnání vyplívá, že změřená data mají velkou odchylku od skutečného parametru mazání v celém měřeném rozsahu. Od parametru mazání 0 až 2 dosahují odchylky více než sta procent. Nad touto oblastí nabývají odchylky měření maximálně do 80 %. Avšak z grafu vyplívá, že i přes velkou odchylku v měření je možné z většího množství statistických dat zjistit obecně informaci o parametru mazání. Dle zhodnocení dat nelze doporučit tento druh měření pro další postup.

## Měření dle množství hodnot ve vybraném intervalu napětí na obvodu 2

Pomocí tribometru *ball-on-disk* s *kolorimetrickou interferometrií* a *obvodu 2* byl změřen se vzorkováním 24 kHz signál střídavého harmonického napětí o frekvenci 1,2 kHz na kontaktu za dobu 1 s. Z celého naměřeného signálu bylo určováno množství hodnot v intervalu napětí od -0,1 až 0,1 V. Dané rozmezí okolo nulové hodnoty je voleno tak, aby amplituda nežádoucího rušivého signálu o frekvenci 50 Hz přicházejícího ze sítě tento interval nepřesahovala a tím neovlivňovala měření. Následně byla vytvořena závislost mezi množstvím hodnot v daném intervalu a tloušťkou mazacího filmu (viz Obr. 5-34). Tloušťka mazacího filmu je následně přepočítána na parametr mazání. Závislost množství hodnot z daného intervalu vůči režimu mazání je využita k proložení funkcí dle rovnice (27). Daná funkce tvoří základ pro samotné měření režimu mazání z množství hodnot ve zvoleném intervalu dle *obvodu 2*. Poté je srovnán režim mazání získaný pomocí *obvodu 2* s ověřeným režimem mazání vypočítaným z minimální tloušťky maziva, která byla změřena pomocí *kolorimetrické interferometrie* (viz Obr. 5-37). Nakonec je zhodnoceno měření a doporučeny oblasti dle parametru mazání, ve kterých je vhodné měřit.

V Obr. 5-34 horní osa lze vidět závislost minimální tloušťky mazacího filmu k počtu hodnot z měřeného intervalu (-0,1–0,1 V).



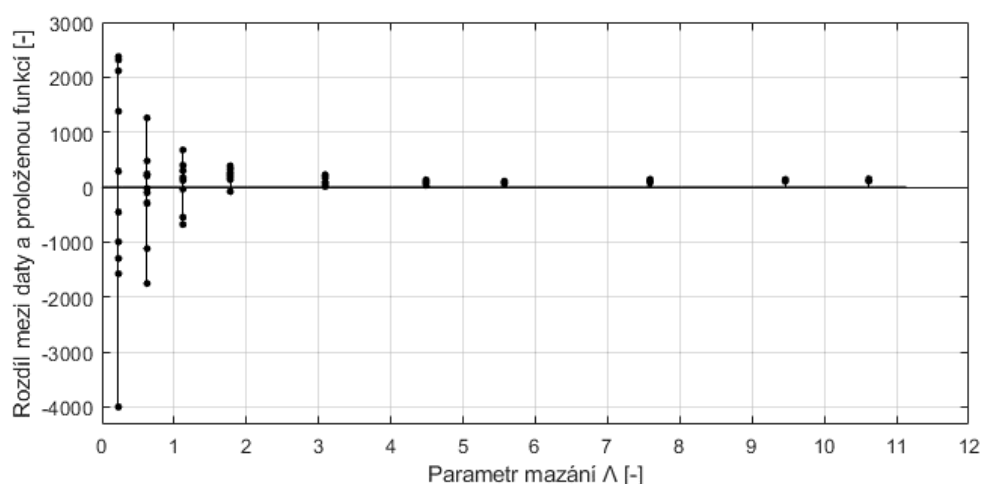
Obr. 5-34 Graf minimální tloušťky maziva / parametru mazání k množství hodnot ve výběru [-]

Minimální tloušťka mazacího filmu byla přepočítána na parametr mazání. Závislost parametru mazání vůči počtu hodnot z měřeného intervalu je možné vidět na Obr. 5-34 horní osa.

Množství hodnot vůči parametru mazání (Obr. 5-34 dolní osa) bylo následně proloženo mocninnou funkcí vybranou na základě koeficientu determinace. Koeficient determinace pro danou funkci je 98,75 %, což vypovídá o dobrém proložení dat. Funkce je dána rovnicí:

$$E(\Lambda) = a \cdot \Lambda^b \quad (35)$$

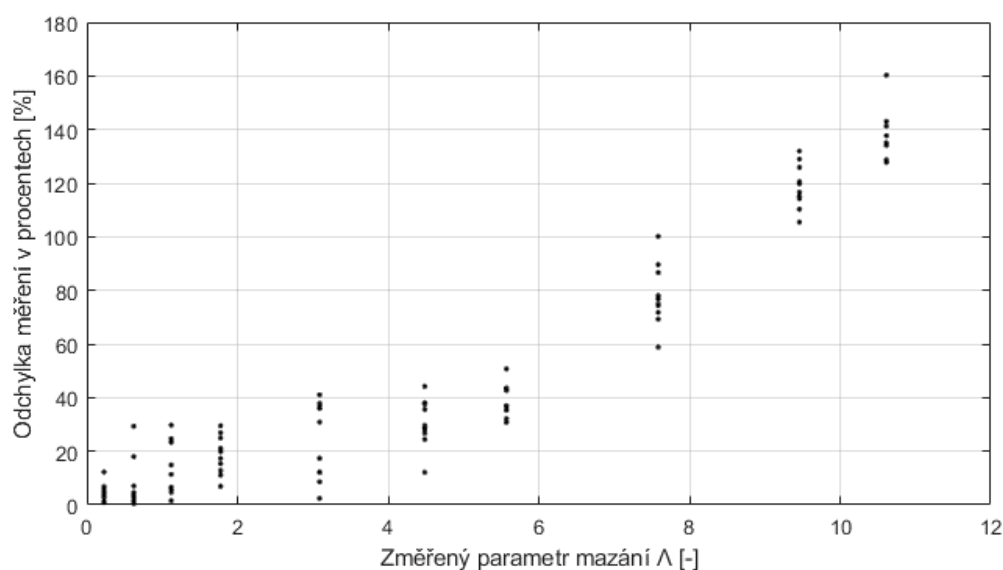
kde jsou parametry  $a = 1875$ , parametr  $b = -1,633$ ,  $E(\Lambda)$  je množství hodnot z vybraného intervalu a  $\Lambda$  je parametr mazání.



Obr. 5-35 Graf odchylky v množství hodnot mezi daty a proloženou funkcí

Odchylky množství hodnot v intervalu mezi prokládanými daty a proloženou funkcí a lze vidět na Obr. 5-35, kde jde pozorovat větší odchylky v oblasti pod parametrem mazání 2. Větší odchylky v množství hodnot jsou způsobeny strmým sklonem prokládané funkce.

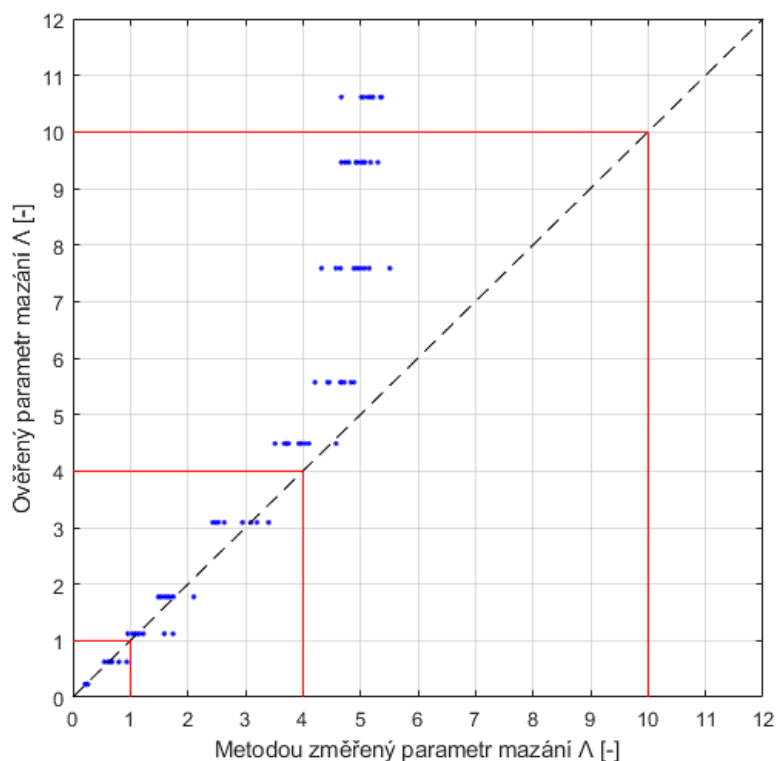
Pomocí proložené funkce je nakonec určen režim mazání z množství hodnot v intervalu od -0,1 až 0,1 V. Tímto způsobem je navrženo vyhodnocení režimu mazání dle *obvodu 2*.



Obr. 5-36 Odchylky v měření obvod 2 četnost dotyků



Změřený režim mazání je následně srovnán s ověřeným režimem mazání, který byl spočítán z minimální tloušťky mazacího filmu naměřené *kolorimetrickou interferometrií*. Odchylku měření lze vidět na Obr. 5-36. Celkové porovnání ověřeného režimu mazání od změřeného dle *obvodu 2* lze pozorovat na Obr. 5-37.



Obr. 5-37 Graf měřeného k ověřenému parametru mazání – Obvod 2 (četnost)

Z odchylky v měření dotyků dle *obvodu 2* na Obr. 5-36 jde vidět, že přesnost je větší u nižších parametrů mazání. V úseku od parametru mazání 0 až 2 je odchylka v měření 30 %. U parametru mazání 5 je překročena odchylka čítající 50 %. Nad parametrem mazání 5 je již měření postihnuto přílišnou chybou měření. Dle porovnaných dat lze doporučit měření v rozsahu parametru mazání 0 až 3.

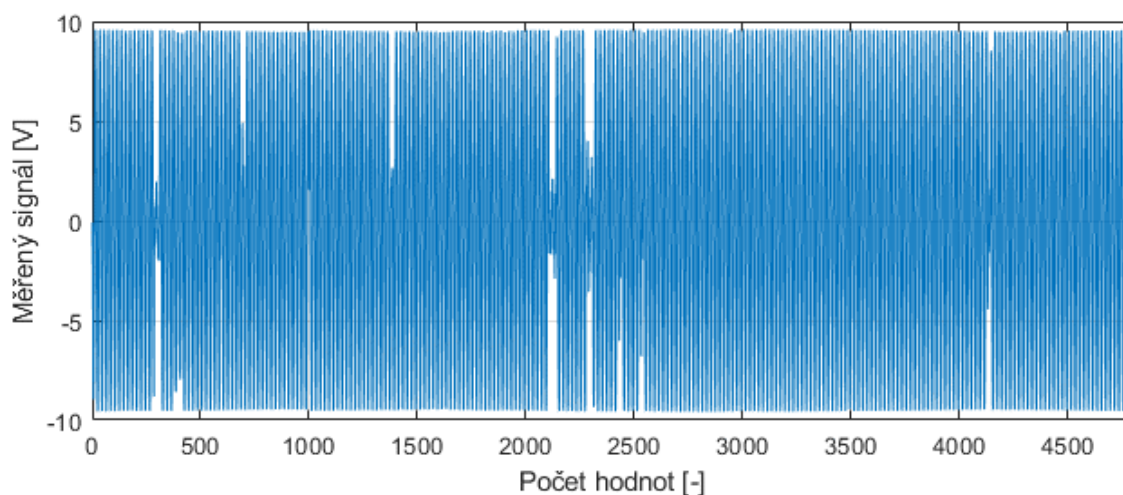
### 5.3.2 Výsledky z měření na tribometru dle metod zjišťující kapacitu kontaktu

Kapacitu kontaktu lze zjistit u všech tří navržených obvodů. Pro měření kapacity jsou však zvoleny dva obvody, obvod 2 a obvod 3. Obvod 1 není uvažován, neboť určení kapacity je možné jen v době nabíjení kontaktu, což je neperiodický děj, který není pro měření dostatečně kontinuální. Před samotným vyhodnocováním u *obvodů* 2 a 3 je nejprve posuzováno mezi odečítáním amplitudy dle histogramu a vyhodnocením dle soustavy rovnic s následnou filtrací signálu. Oba zmíněné způsoby zjištění amplitudy budou porovnány a na základě testů bude vybrán vhodnější způsob, který bude využit při měření kapacity u *obvodu* 2 a 3.

#### Porovnání mezi způsoby zjištění amplitud

Pro zjištění, s jakou úspěšností lze odečíst amplitudu dle maxim v histogramu anebo dle soustavy dvou rovnic (pro *obvod* 2), je využit vzorek z měření na tribometru *ball-on-disk* s parametrem mazání pohybujícím se kolem 5,5. Při tomto parametru mazání se již v měření vyskytují často opakující se dotyky, není jich ale tolik, aby měření bylo zcela znemožněno. Dle vizuálního zjištění se amplituda vzorového napětového signálu pohybuje v rozmezí od 9,55 až 9,65 V. Obě vypočítané amplitudy je možné, v určitých případech i nutné filtrovat, avšak pro posouzení způsobu zjištění amplitud není filtrace nutná.

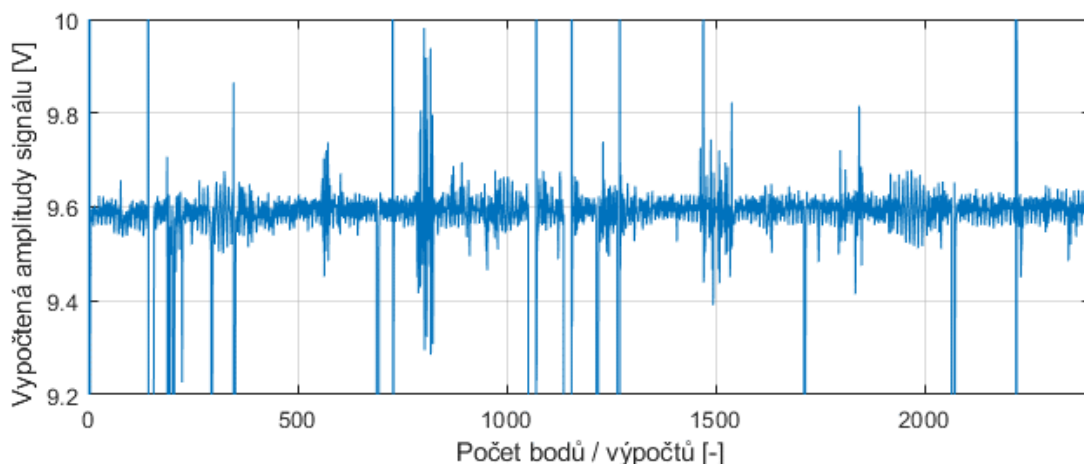
Vstupní napětový signál je vidět na Obr. 5-38. Signál je měřen 0,2 s a má 24 000 hodnot. Jeho amplituda se dle vizuálního odečtení pohybuje mezi hodnotou 9,5 až 9,6 V.



Obr. 5-38 Vstupní napětový signál pro posouzení způsobu zjištění amplitudy

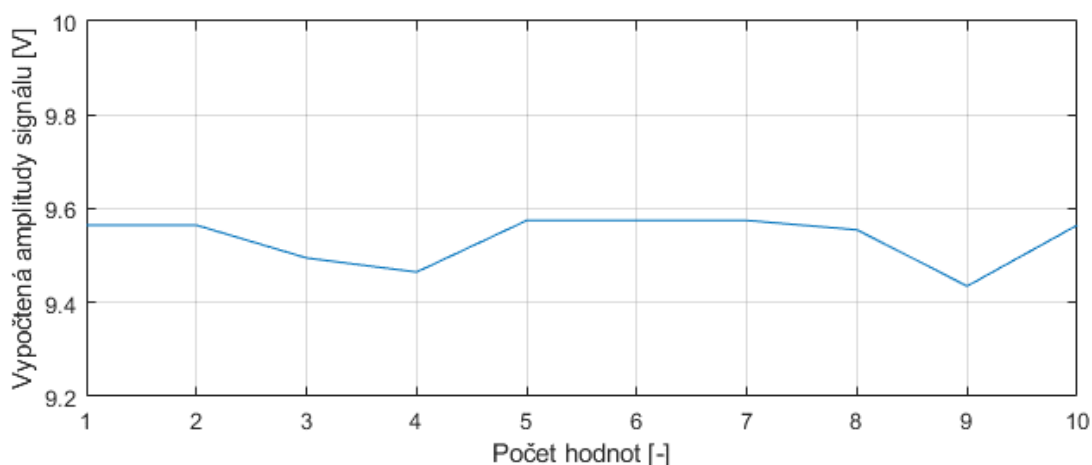
Amplituda je prvně vypočítána pomocí soustavy rovnic o dvou neznámých (viz kap. 5.2.2.1) v programu MATLAB. Výsledky výpočtu odpovídají skutečnému rozsahu napětí amplitudy, jak je vidět na Obr. 5-39. Perioda vypočtených hodnot je pouze dvakrát větší jak vzorkovací perioda měřicí karty, avšak kvůli vysokému počtu výpočtu zabírá zjištění amplitudy velký výpočetní čas počítače.

Lze také pozorovat, že výpočet rovnic není ovlivněn jen dotyky kontaktních ploch, které znamenají výrazný pokles odporu kontaktu, ale i drobným kolísáním v odporu, který je následkem přibližování kontaktních ploch nebo nežádoucím rušením z okolí.



Obr. 5-39 Amplituda napětového signálu zjištěná soustavou rovnic

Stejný vzorek, 0,2 s signálu, byl použit pro výpočet amplitudy dle množství hodnot v definovaných napětových intervalech (histogram), kde je největší množství hodnot přítomné právě na amplitudě napětí (viz kap. 5.2.2.1). Na Obr. 5-40 lze vidět, že velikost amplitudy napětí odpovídá vizuálně zjištěnému rozsahu. Velikost intervalů histogramu je 0,01 V a okno, pro které se histogram vyhodnocuje, je 0,02 s. Měření má nižší frekvenci (50 Hz) než frekvence měřicí karty (24 000 Hz). Výpočetní náročnost odečtu amplitudy je velice nízká.



Obr. 5-40 Amplituda napětového signálu zjištěná pomocí histogramu

Z hlediska přesnosti jsou obě metody zjištění amplitudy srovnatelné. Výpočet dle soustavy rovnic poskytuje kontinuálnější zjištění amplitudy než zjištění dle histogramu, ale za cenu vysokého početního času. S ohledem na velkou početní náročnost bylo vybráno zjištění amplitudy dle histogramu.

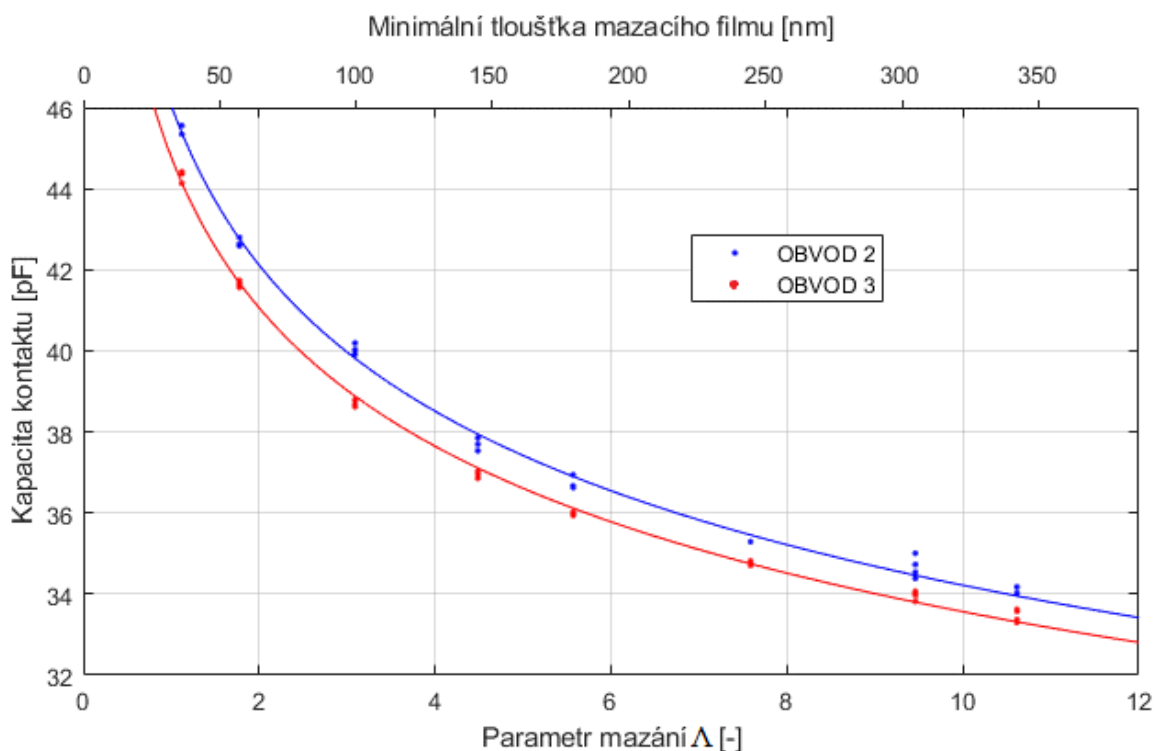
#### Měření kapacity dle amplitud získaných z histogramu

Měření probíhají jednotlivě na dvou obvodech, a to na *obvodu 1* a *obvodu 2*. U obou obvodů je nejprve změřen harmonický napětový signál o frekvenci 1200 Hz po dobu 1 s se vzorkovací frekvencí 24 kHz. Změřené hodnoty jsou následně rozřazeny dle velikosti napětí do úseků (histogram), z čehož jeden usek je velký 0,004 V. Interval napětí s nejvíce hodnotami je určen jako amplituda napětového signálu. V případě *obvodu 3* je nutné ještě před zjišťováním amplitudy odečíst od měřeného signálu odchylku středního napětí od nulové hodnoty. Ke zjištění středního napětí byl využit plovoucí filtr z průměrování. Velikost okna filtru byl čas jedné a půl periody napětového signálu. Následně jsou amplitudy signálu přepočítány na kapacitu kontaktu. V případě *obvodu 2* dle rovnice (30) a v případě *obvodu 3* dle rovnice (32).

U obou obvodů je nutné kalibrovat měřenou kapacitu. Do obvodů je zapojen kondenzátor (etalon, 100 pF) známé hodnoty a tento kondenzátor je metodou změřen. Odchylka měření od známé hodnoty je poté odečtena od všech měření. Aby nedošlo k chybě v měření prvně připojeného kondenzátoru, je ještě metodou změřen druhý kondenzátor známé kapacity (200 pF) připojený namísto kontaktu. Změřená kapacita druhého kondenzátoru v již kalibrovaném obvodu by se měla lišit od jeho skutečné hodnoty jen minimálně.

Poté je vytvořena závislost mezi kapacitou kontaktu a minimální tloušťkou maziva, která byla naměřena *kolorimetrickou interferometrií*. Minimální tloušťka je poté přepočítána na parametr mazání a vzniklá závislost s kapacitou kontaktu je proložena funkcí. Daná funkce tvoří základ pro vyhodnocení režimu mazání pro metodu měření dle kapacity kontaktu u *obvodu 2* a *obvodu 3*. Parametry mazání změřené dle *obvodu 2* jsou poté srovnány s hodnotami získanými z *kolorimetrické interferometrie*. Parametry mazání z *obvodu 3* nejsou v textu srovnávány, neboť mají velice podobné výsledky jak hodnoty *obvodu 2*. Na závěr je provedeno zhodnocení.

Na Obr. 5-41 horní osa jde vidět závislost mezi minimální tloušťkou mazacího filmu a kapacitami kontaktu před kalibrací obvodů, měřenou pomocí *obvodu 2* a *obvodu 3*.



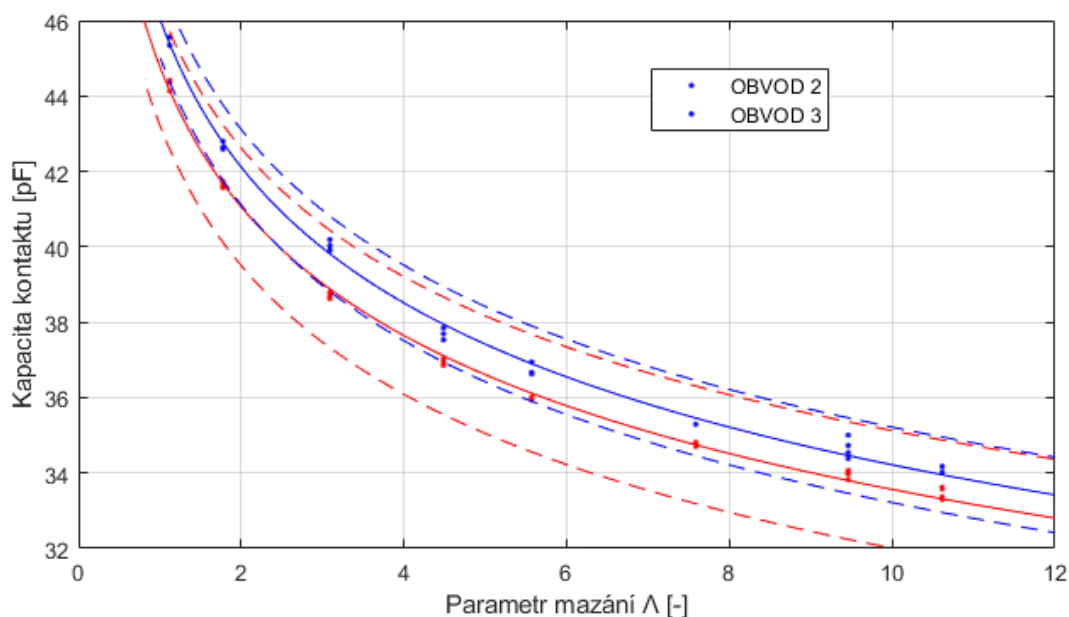
Obr. 5-41 Graf kapacity kontaktu dle *obvodu 2* a *obvodu 3* na minimální tloušťce maziva / parametru mazání

Na Obr. 5-41 dolní osa lze již pozorovat kalibrované hodnoty kapacit dle 100 pF kondenzátoru v závislosti na parametru mazání, a také je možné pozorovat proložení obou řad výsledků funkcí.

Kalibrace je v podstatě odečtení od všech změřených hodnot, u *obvodu 2* hodnota 56.4191 pF, a v případě *obvodu 3* hodnota 54.5473 pF.

Významným problémem měření jsou přesnosti kalibračních kondenzátorů a přesnost referenčního kondenzátoru pro *obvod 3*. Na Obr. 5-42 je možné vidět čárkované hranice, které vyznačují pro oba obvody vliv těchto kondenzátorů na zjištěnou kapacitu kontaktu. Konkrétní přesnost kalibračního kondenzátoru, která odpovídá zaznačeným hranicím, je  $\pm 1$  pF z celkové hodnoty kondenzátoru 100 pF. Čárkovaná oblast kapacita u *obvodu 3* je kromě kalibračního kondenzátoru ještě ovlivněna referenčním kondenzátorem přítomným přímo ve stavbě *obvodu 3*.

Jak je z Obr. 5-42 vidět, ovlivnění přesností zmíněných kondenzátoru je ke škále měřené kapacity dosti vysoká. Pro zajištění stejných hodnot kapacit při opakovaném měření je tedy nutné použít buď velice přesný kondenzátor, nebo mít kapacitu kondenzátorů velice přesně změřenou.



Obr. 5-42 Přesnost kalibračních a referenčních kondenzátorů obvodu 2 a 3

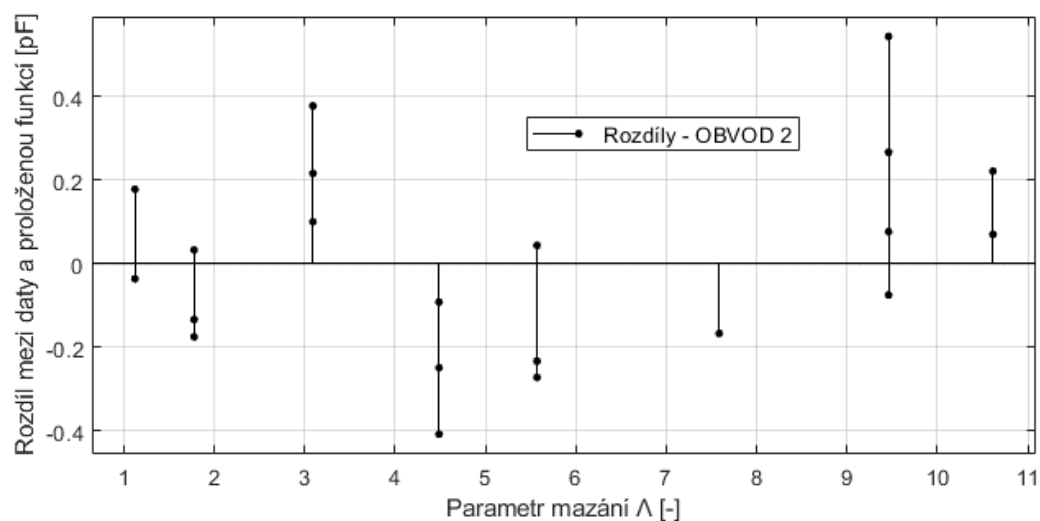
K proložení dat z *obvodů* 2 a 3 se na základě koeficientu determinace jeví jako vhodné mocninné funkce. Koeficient determinace mezi první funkcí a měřenými hodnotami pomocí *obvodu* 2 je 99,71 % a mezi druhou funkcí a měřenými hodnotami *obvodem* 3 je 99,79 %.

Funkce jsou dány rovnicí:

$$C(\Lambda) = a \cdot \Lambda^b \quad (36)$$

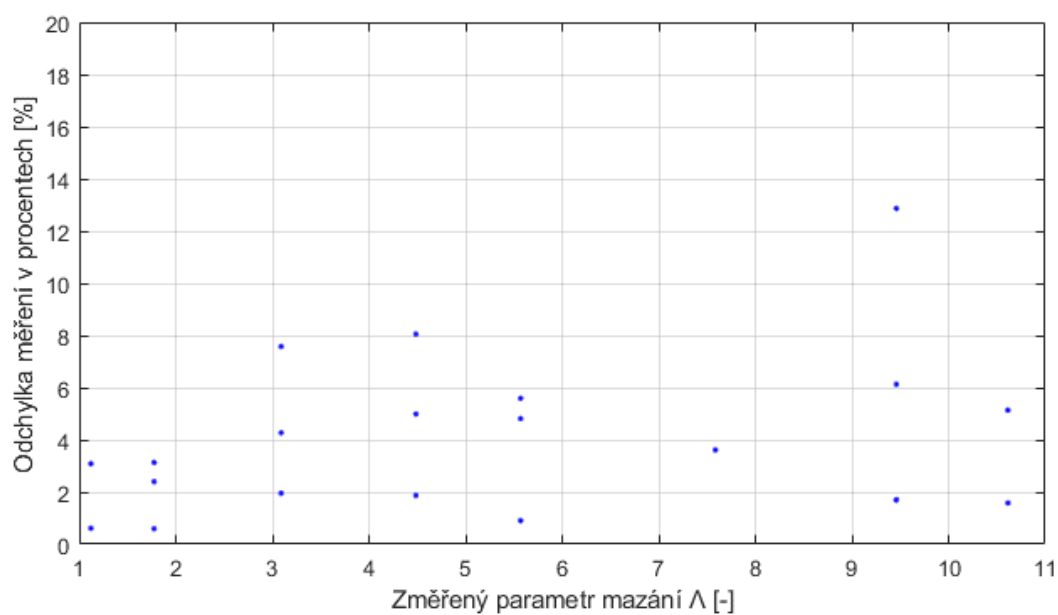
kde jsou parametry pro *obvod* 2  $a = 46,05$ ,  $b = -0,129$  a parametry pro *obvod* 3  $a = 44,78$ ,  $b = -0,1252$ ,  $C(\Lambda)$  je kapacita kontaktu v pF a  $\Lambda$  je parametr mazání.

Odchyly mezi kapacitou kontaktu a proloženou funkcí u *obvodu* 2 lze pozorovat na Obr. 5-43. Odchyly pro *obvod* 3 jsou velice podobné jako u *obvodu* 2, a proto již nejsou v textu zpracovány. Je vidět, že proložení funkcí je kvalitní, neboť se odchyly pohybují na minimální úrovni do 0,6 pF.



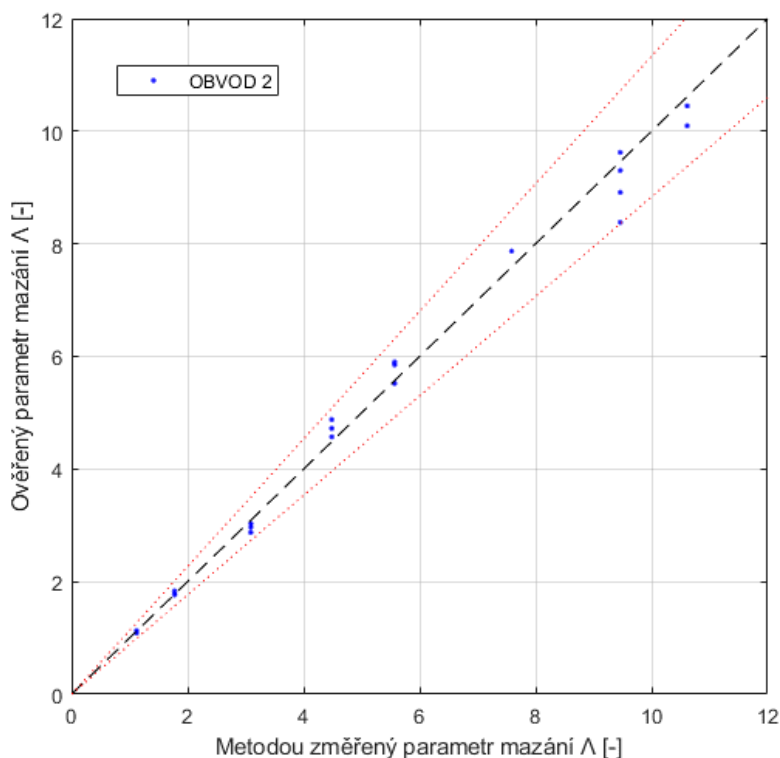
Obr. 5-43 Graf odchylky kapacity kontaktu k proložené funkci

Odchylky v měření dle kapacity v *obvodu 2* s ověřeným měřením dle *kolorimetrické interferometrie* jsou vyobrazeny na Obr. 5-44.



Obr. 5-44 Odchylky v měření obvod 2 dle kapacity kontaktu

Celkové srovnání metody měření kapacity dle *obvodu 2* s ověřeným měřením pomocí *kolorimetrické interferometrie* lze vidět na Obr. 5-45.



Obr. 5-45 Graf měřeného k ověřenému parametru mazání – obvod 2 (kapacita)

Z odchylky měření kapacity v obvodu 2 (viz Obr. 5-44) lze pozorovat podobný trend, kdy maximální odchylky činí 13 %. Problematické je však to, že tato měřicí metoda není schopna zjistit kapacitu kontaktu v nízkých režimech mazání, přibližně pod parametrem mazání  $\sim 1$ . Data z tohoto úseku nebyla kvůli přílišným dotykům kontaktních ploch pro měření dostatečně čitelná. Dle dosahovaných přesností metody lze doporučit *obvod 2* i *3* pro další měření v oblasti parametru mazání  $\sim 1$  a výše.

### 5.3.3 Celkové zhodnocení měření na tribometru ball-on-disk

Dle výsledků z měření je vybrán pro další měření *obvod 2*. Jde o obvod, u kterého lze měřit četnost dotyků i kapacitu kontaktu. Z výsledků vyplývá, že měření parametrů mazání dle četnosti dotyků na *obvodu 2* je do hodnoty parametru mazání 2 dostatečně přesné ( $\Lambda$  0–2 odchylka 30 %,  $\Lambda > 2$  odchylka 160 %), oproti měření dle odporu na *obvodu 1* ( $\Lambda$  0–2 odchylka větší jak 600 %,  $\Lambda > 2$  odchylka 80 %). Nad hodnotu parametru mazání 2 je vhodné použít stejné výsledky měření *obvodu 2* ke změření kapacity, která dle výsledku dosahuje přesnosti asi 13 %. Podobného výsledku se dá docílit i měřením podle *obvodu 3*, avšak měření je postihnuto větší chybou, neboť do výsledků vstupují dvě nepřesnosti, a to nepřesnost *kalibračního kondenzátoru* a nepřesnost *referenčního kondenzátoru*. Měření četnosti dotyků pomocí *obvodu 3* nebylo realizováno, neboť bylo již dříve označeno za nevhodné.



## 5.4 Aplikace měřicího řetězce na měřicí zařízení

Měřicí řetězec, který byl odzkoušen na zařízení *ball-on-disk*, je v této kapitole aplikován na testovací zařízení s kuličkovým ložiskem. Namísto jednoho studovaného kontaktu, jak je tomu u tribometru, je studováno valivé ložisko, které má mazaných kontaktů hned několik. Pro měření byl vybrán *obvod 2*. Daný obvod byl hodnocen podle měření na tribometru jako nejvhodnější, neboť pro monitorování mazání lze použít dva principy jeho vyhodnocování. A to vyhodnocování dle četnosti dotyků a dle kapacity. Oba principy jsou aplikovatelné jen po určité škále parametru mazání. Vyhodnocení dle četnosti dotyků na *obvodu 2* lze doporučit podle měření na tribometru do hodnoty parametru mazání 2. Nad parametrem mazání 2 je možné použít vyhodnocení dle kapacity kontaktu. V tab. 5-4 lze pozorovat hlavní veličiny měření na testovacím zařízení.

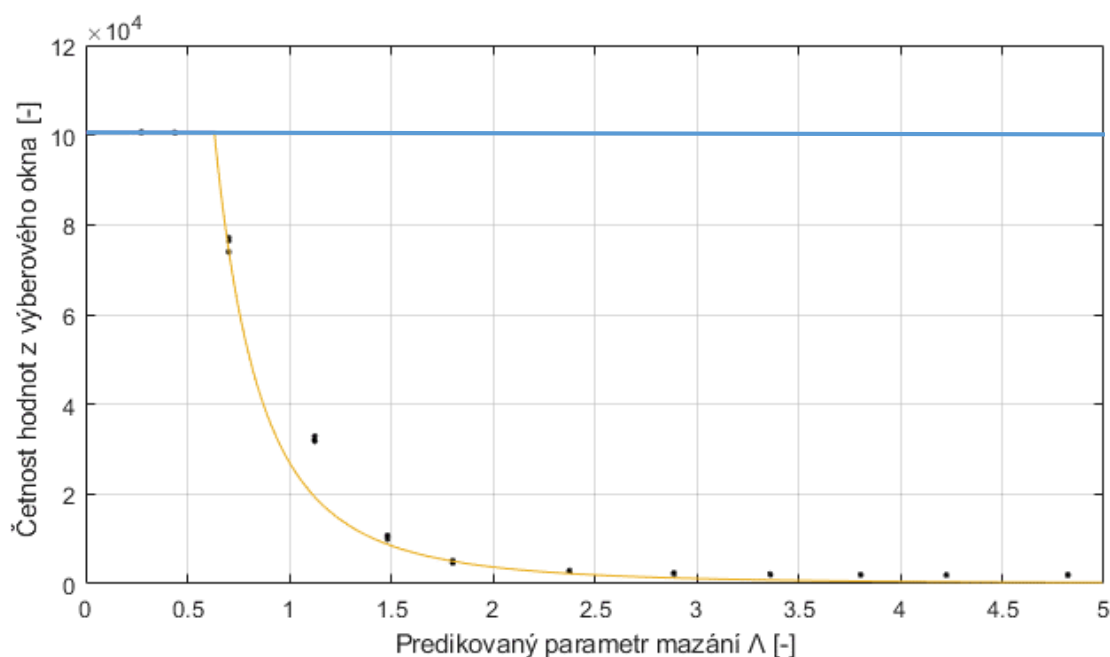
tab. 5-4 Veličiny měření testovacího zařízení

Elektrické veličiny obvodů	
název obvodu	obvod 2
typ zdroje	střídavý harmonický
napětí na zdroji	10 V
frekvence zdroje	5000 Hz
přídavný odpor	400 kΩ
Veličiny testovacího zařízení	
používaný rozsah otáček elektromotoru	25–1700 ot/min
rozsah tečná rychlost valení	0,03–1,7 m/s
rozsah parametru mazání $\Lambda$	0,2–6
zatížení testovaného ložiska	200 N, 600 N, 1500 N
použitý olej	Mobil Glygoyle 150, FVA 3
materiály účastníci se kontaktu	ocel / ocel
drsnost kuličky [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q = 0,17$ ; $R_a = 0,1$
drsnost prstence [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q = 0,15$ ; $R_a = 0,1$
typ ložiska	SKF 6205 (radiální, kuličkové)
Dosahované veličiny měřeného kontaktu na valivém ložisku	
kapacita kontaktu (kondenzátor kontakt)	300–400 pF
frekvence vzorkování karty NI 6002	1 kanál - 98 kHz, 2 kanály - 48 kHz

### 5.4.1 Měření parametru mazání dle četnosti dotyku na obvodu 2

Na testovacím zařízení byl změřen se vzorkováním 98 kHz napěťový signál o frekvenci 5 kHz za dobu 1 s. Z naměřeného signálu bylo spočítáno množství hodnot v intervalu napětí od -0,1 až 0,1 V. Na testované ložisko bylo pomocí pneumatických válců vyvozeno zatížení 200 N. Dle výsledků byla vytvořena závislost mezi četností spočítaných hodnot a predikovaným parametrem mazání. Daná závislost byla proložena funkcí (viz Obr. 5-46). Tato funkce bude tvořit základ pro vyhodnocování dle četnosti dotyků na *obvodu 2*. Poté je srovnáno měření parametru mazání dle proložené funkce a je vyčíslena odchylka v měření. Celé měření je nakonec zhodnoceno.

Na Obr. 5-46 lze pozorovat množství hodnot z výběrového intervalu v závislosti na predikovaný parametr mazání.



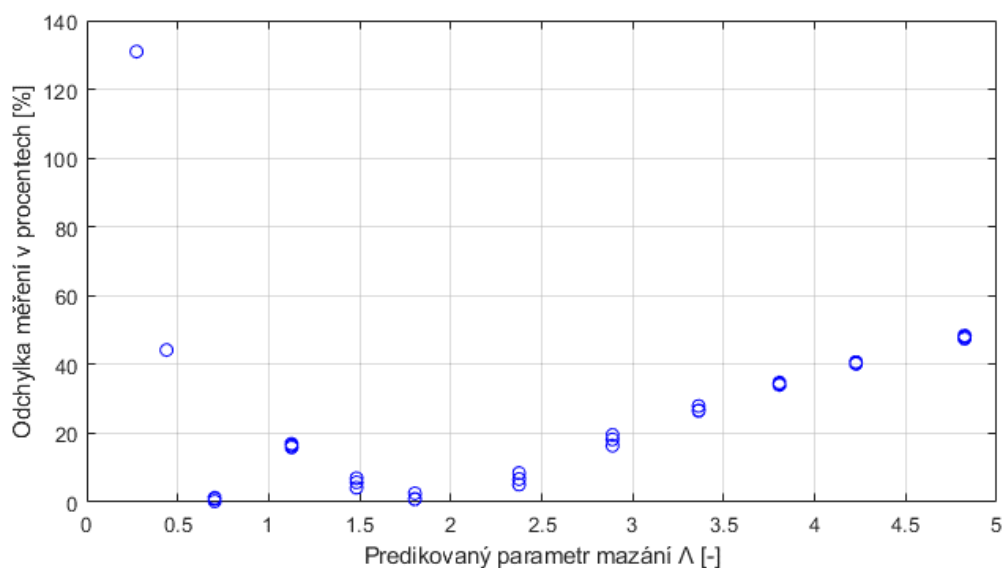
Obr. 5-46 Graf predikovaného parametru mazání k četnosti hodnot z výběrového intervalu

Jednotlivá data z Obr. 5-46 jsou proložena mocninnou funkcí. Tento typ funkce odpovídá funkci, která byla pro stejné měření použita i na tribometr *ball-on-disk*, avšak funkce je opatřena členem navíc, který způsobuje její posuv ve svislém směru. Na Obr. 5-46 (modrá linka) lze pozorovat linii, jež symbolizuje 100% dotyk. Jedná se o změřený průběh chodu ložiska, při kterém v každém změřeném čase ( $T \sim 10^{-5}$ ) dochází ke kovovému kontaktu. Měření v tomto úseku není možné. Mocninná funkce sloužící k proložení dat má koeficient determinace 99,9 %, což jde označit za dostatečné. Funkce je dána rovnicí:

$$E(\Lambda) = a \cdot \Lambda^b + c \quad (36)$$

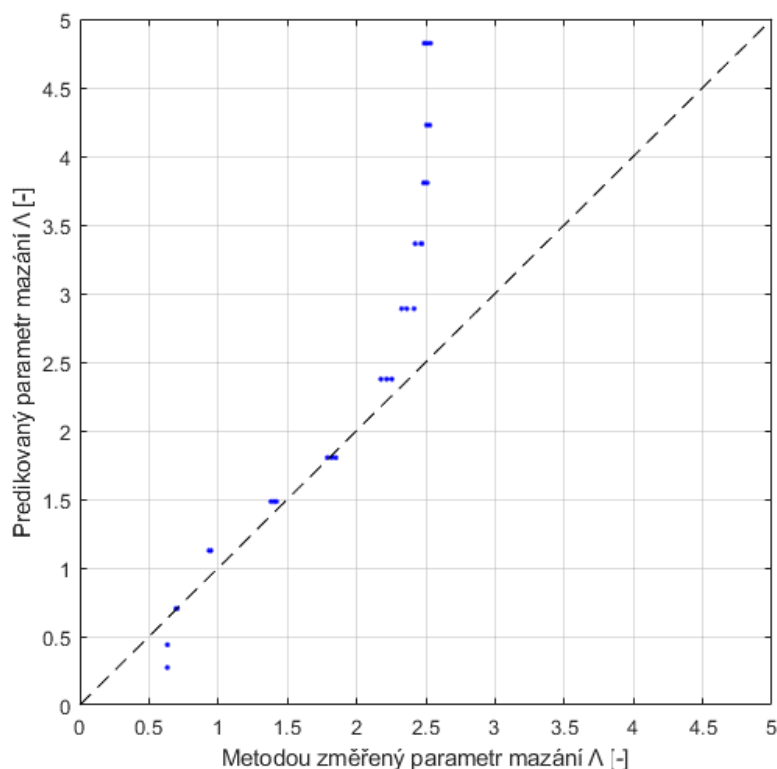
kde jsou parametry  $a = 27130$ , parametr  $b = -2,858$ , parametr  $c = -3$ ,  $E(\Lambda)$  je množství hodnot z vybraného intervalu a  $\Lambda$  je parametr mazání.

Dosahovaná přesnost měření je vidět na Obr. 5-47. Přesnost měření s predikovaným parametrem mazání kolísá od minimální odchylky 1 % až do 131 %. Měření s dobrou přesností nepřesahující 20 % odchylky je možné od parametru mazání 0,7 až 2,5. Podobný interval měření byl již doporučen při prvotním měření na tribometru.



Obr. 5-47 Odchylky v měření obvod 2 dle měření četnosti

Celkové zhodnocení lze pozorovat na Obr. 5-48, kde je srovnán metodou změřený parametr mazání s predikovaným.



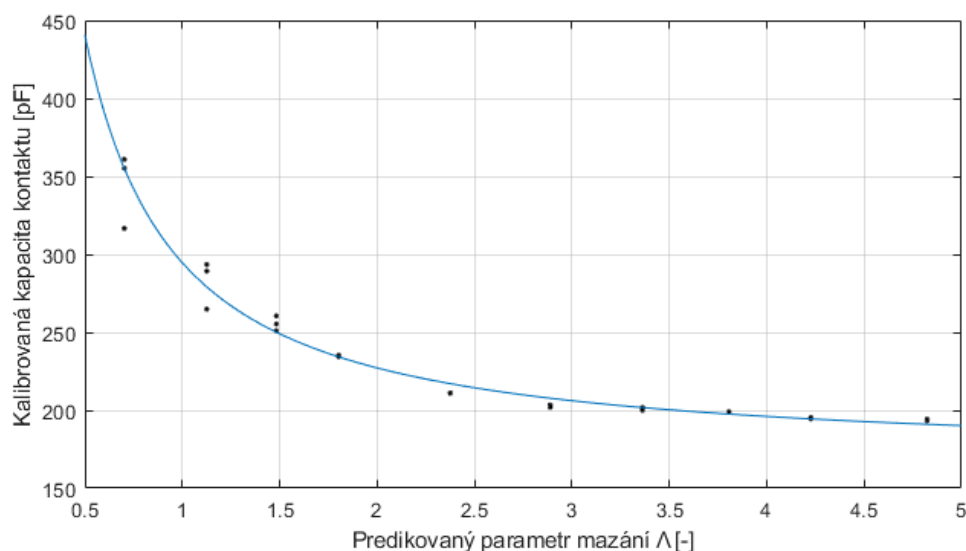
Obr. 5-48 Graf měřeného k predikovanému parametru mazání – obvod 2 (četnost)

Měření režimu mazání dle četnosti dotyků na *obvodu 2* bude nyní sloužit pro další měření. Měření na kuličkovém ložisku (testovacím zařízení) má srovnatelné výsledky jako měření na tribometru *ball-on-disk*. Tato metoda měření režimu mazání bude použita pro měření vlivu teploty a změny maziva. Ovšem toto měření má podle testování na tribometru a na kuličkovém ložisku omezené použití v intervalu parametru mazání 0,7 až 2,5.

#### 5.4.2 Měření parametru mazání dle kapacity na obvodu 2

Z totožných dat (vzorkováním karty 98 kHz, frekvence harmonického napětí 5 kHz, časový interval 1 s), která byla použita pro vyhodnocování režimu mazání na základě četnosti dotyků v předešlé kapitole, byla na stejném obvodu (*obvodu 2*) vyhodnocena kapacita kontaktu. Kapacita byla vypočítaná dle amplitudy zjištěné dle maxim histogramu (viz 5.2.2.1). Výpočet amplitudy podle soustavy rovnic sloužil vzhledem k jeho časové náročnosti pouze jako kontrola správnosti zjištěné amplitudy. Měření probíhalo podobně jako na tribometru *ball-on-disk*, s tím, že začínalo kalibrací měřicího řetězce kondenzátorem o kapacitě 100 pF (před a po měřeních). Následně byla z amplitudy vypočítána kapacita (32), ke které byly dopočítány predikované parametry mazání. Data byla proložena funkcí, která udává závislost mezi kapacitou kontaktu a parametrem mazání a která slouží jako základ pro vyhodnocování měření dle *obvodu 2*. Pomocí proložené funkce byly následně přímo vypočítány parametry mazání a porovnány s predikovanými. Na závěr je měření zhodnoceno.

Na Obr. 5-49 lze pozorovat vypočítané kapacity v závislosti na predikovaném parametru mazání.



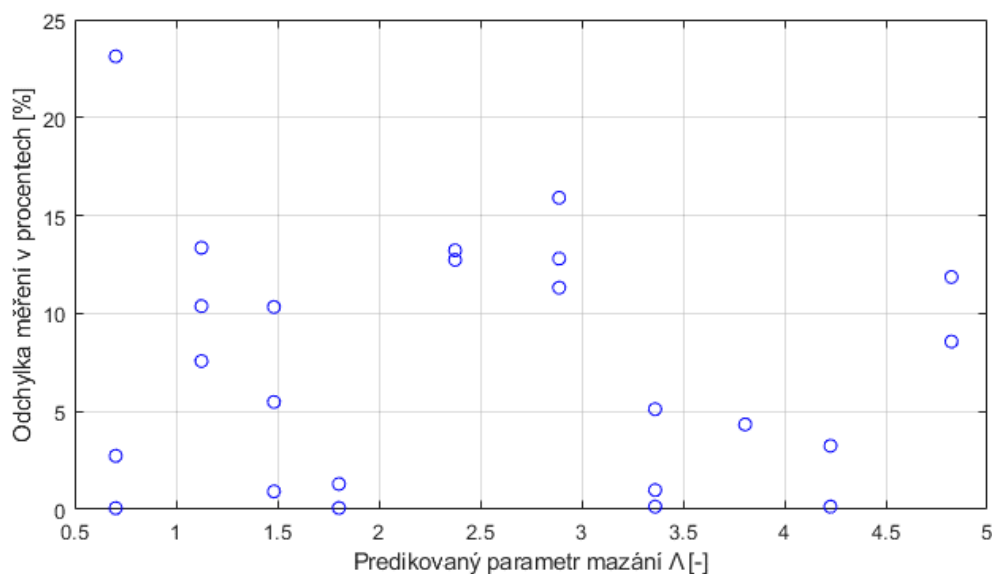
Obr. 5-49 Graf kapacity kontaktu dle obvodu 2 parametru mazání

V obrázku Obr. 5-49 je také vyobrazena mocninná funkce, kterou jsou hodnoty kapacity proloženy s koeficientem determinace 99,28 %, což vypovídá o dobré shodě proložené křivky s prokládanými daty. Funkce je dána rovnicí:

$$E(\Lambda) = a \cdot \Lambda^b + c \quad (36)$$

kde jsou parametry  $a = 125,2$ , parametr  $b = -1,116$ , parametr  $c = -169,4$ ,  $E(\Lambda)$  je množství hodnot z vybraného intervalu a  $\Lambda$  je parametr mazání.

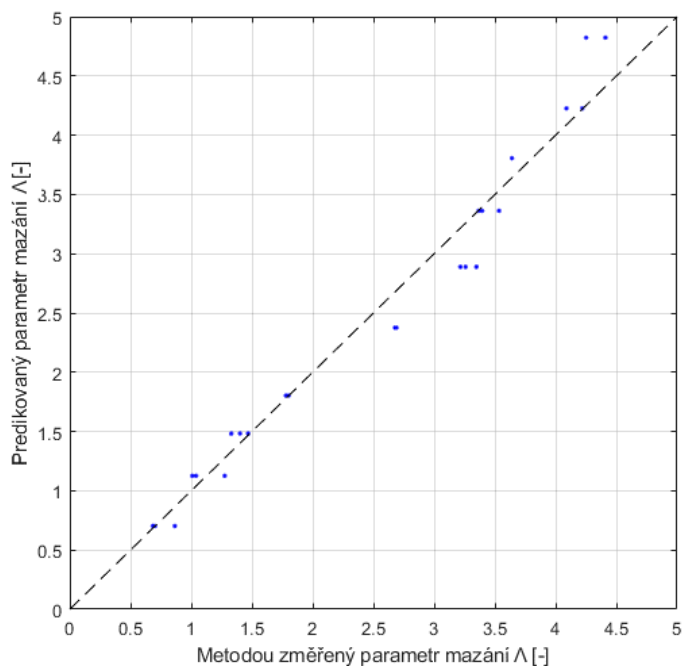
Na základě proložené funkce byly z kapacit kontaktu vyčísleny parametry mazání, které byly srovnány s predikovanými, viz Obr. 5-50.



Obr. 5-50 Odchylky v měření obvod 2 dle měření kapacity

Přesnost měření se dle porovnání (viz Obr. 5-50) pohybuje u parametru mazání nad hodnotou 0,5 do 25 %. Pod parametr mazání 1 nelze úspěšně zjistit kapacitu, neboť měření je postihnuto velkou chybou, která je důsledkem dotyků kontaktních ploch ložiska.

Celkové srovnání zjištěných parametrů mazání k predikovaným lze vidět na Obr. 5-51.



Obr. 5-51 Celkové porovnání změřených parametrů mazání k predikovaným

Měření režimu mazání dle kapacity na *obvodu 2* je nyní určeno k posouzení vlivu teploty a oleje na samotné měření. Výsledky z měření na kuličkovém ložisku (testovacím zařízení) mají srovnatelné výsledky s měřeními na tribometru. Měřicí metoda je dle výsledků omezena parametrem mazání menším než 0,5.

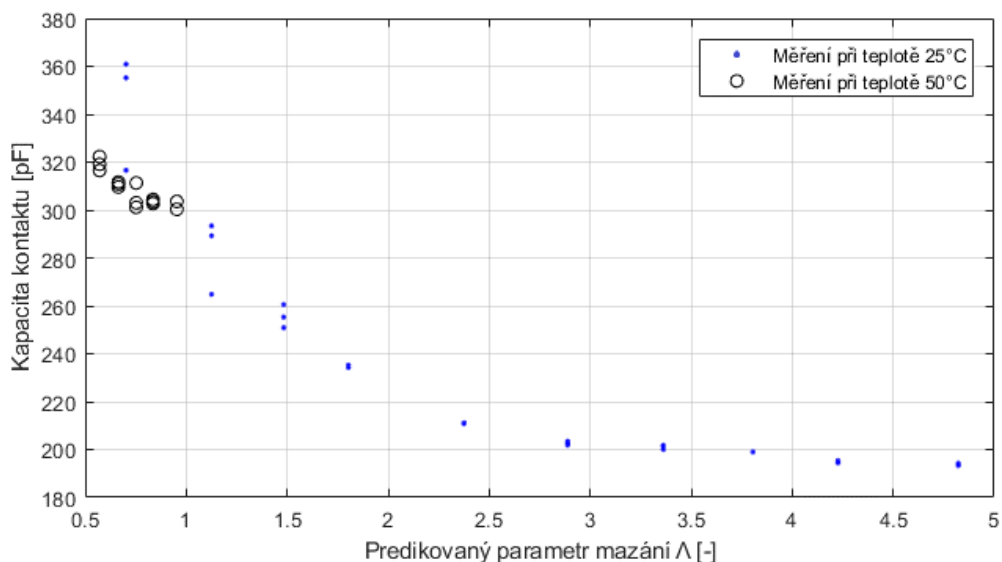
Pro další měření vlivu teploty a oleje bude použito principu měření na základě množství dotyků kontaktních ploch a dle principu měření kapacity. Oba principy jsou měřené na *obvodu 2* pomocí stejného změřeného napěťového signálu.

Dle měření na ložisku byly zjištěny odchylky, s jakými lze měřit. Monitorování režimu mazání dle množství kovového kontaktu je možné provádět v rozmezí parametru mazání 1 až 2,5 s přesností do 20 %. Měření dle zjištění kapacity se dá provádět v rozsahu parametru mazání 0,5 až 5 s přesností 25 %.

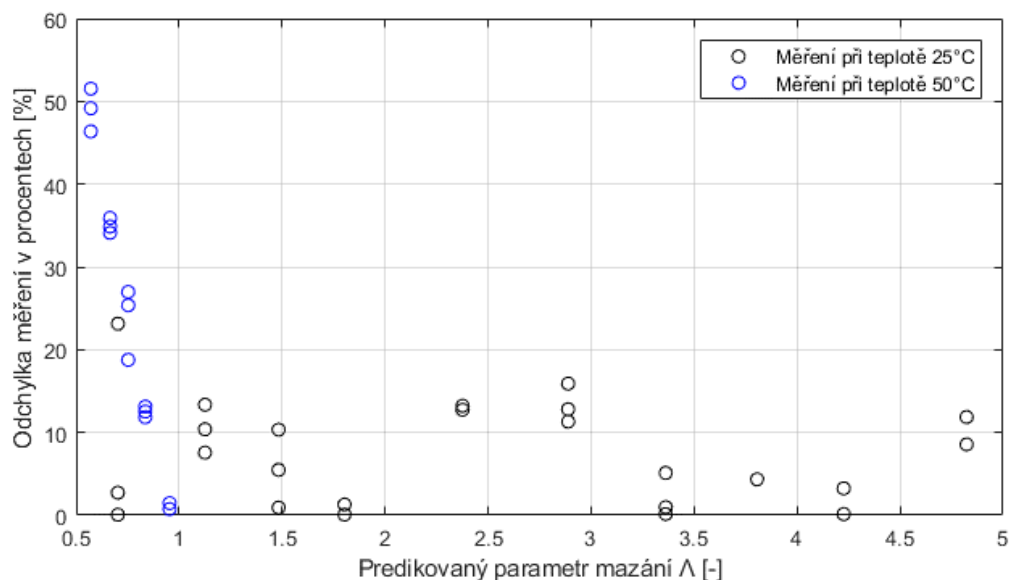
### 5.4.3 Vliv teploty na měření

Aby bylo zjištěno jaký vliv na přesnost měření má teplota, je tento vliv zjišťován na dvou měřeních s rozdílem teplot 25 °C. Rovnice proložení z předchozí kapitoly (viz kap. 5.4.2), kde byl používán *obvod 2* k měření parametru mazání pomocí kapacity, je nyní použita pro studování vlivu teploty. Měřicí řetězec má totožné nastavení jako ve zmíněné přechozí kapitole. Změněná je pouze teplota oleje.

Na obrázku Obr. 5-52 je vidět porovnání mezi měřeními za teplotami 25 °C a 50 °C.



Obr. 5-52 Predikovaný parametr mazání s kapacitou kontaktu



Obr. 5-53 Odchylky měření za zvýšené teploty

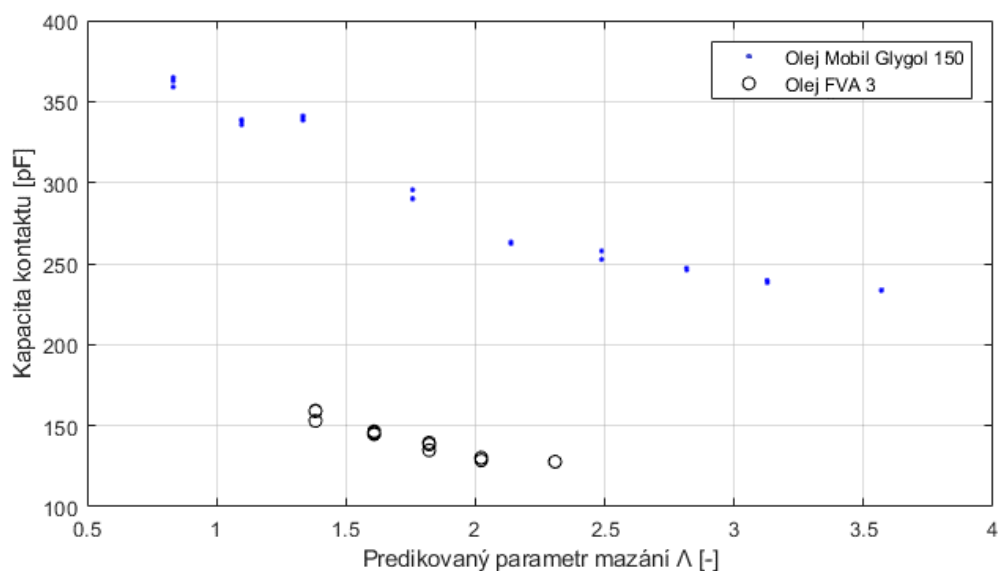
Z výsledků je zřejmé, že následkem zvýšení teploty, vzrostla viskozita oleje a tím klesl parametr mazání. Minimální dosahovaná přesnost měření 52 % je vidět na Obr. 5-53. Měření dle četnosti dotyků není provedeno, neboť dle měření z kap. 5.4.1 nespadá do intervalu parametru mazání, kde lze provádět měření s dostatečnou přesností.

Měření ve zvýšené teplotě dosahuje menší přesnosti s maximální odchylkou 52 %. Avšak vzhledem k nízkému parametru mazání nelze vyloučit ovlivnění měření dotyky výstupků kontaktních ploch.

#### 5.4.4 Vliv typu oleje na měření

Pro studium vlivu typu oleje jsou vybrány dva typy oleje o rozdílných viskozitách. Jedná se o olej *Mobil Glygoyle 150* a olej *FVA 3*. Je použito měření dle četnosti dotyků a kapacity na *obvodu 2*. Měřicí řetězec je stejný jako v kap. 5.4.1 a kap. 5.4.2, jediná změna je v použitém oleji.

Prvně je prováděno měření parametru mazání na *obvodu 2* pomocí kapacity. Na Obr. 5-54 lze pozorovat porovnání jednotlivých olejů a jejich kapacit.



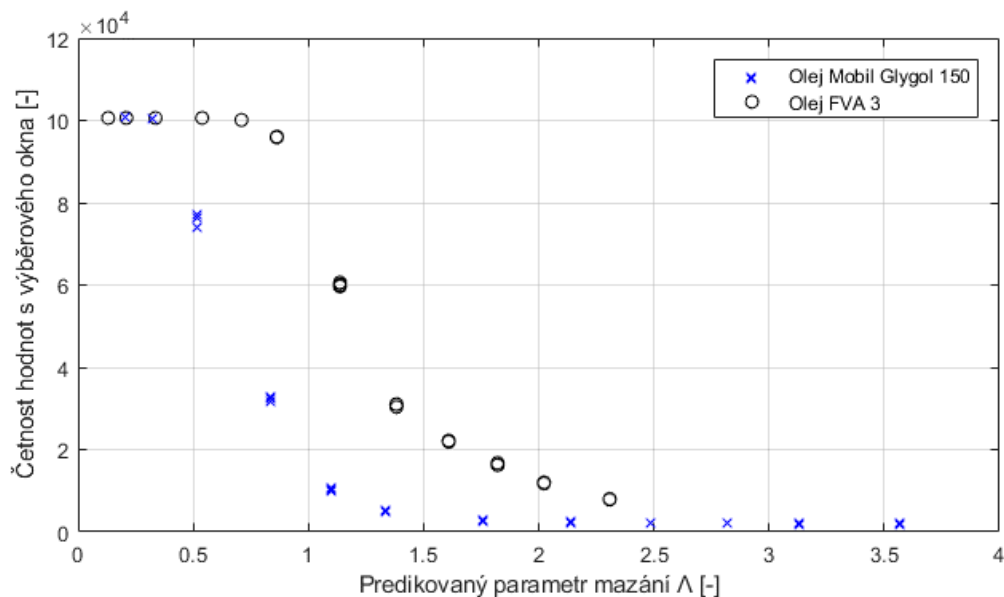
Obr. 5-54 Predikovaný parametr mazání s kapacitou kontaktu

Jelikož má olej *FVA 3* vyšší viskozitu měla by se jeho kapacita pohybovat okolo kapacity 300 až 400 pF, ale jeho kapacita se pohybuje v rozmezí 100 až 170 pF. Rozdílnost kapacit je nejspíš způsobena právě daným olejem. Kvůli dané odlišnosti nespadá do předchozí proložené funkce pro vyhodnocování parametru mazání a nelze pomocí ní parametr mazání vypočítat. Z největší pravděpodobnosti bude pro měření na různých olejích potřeba definovat různé závislostní křivky.

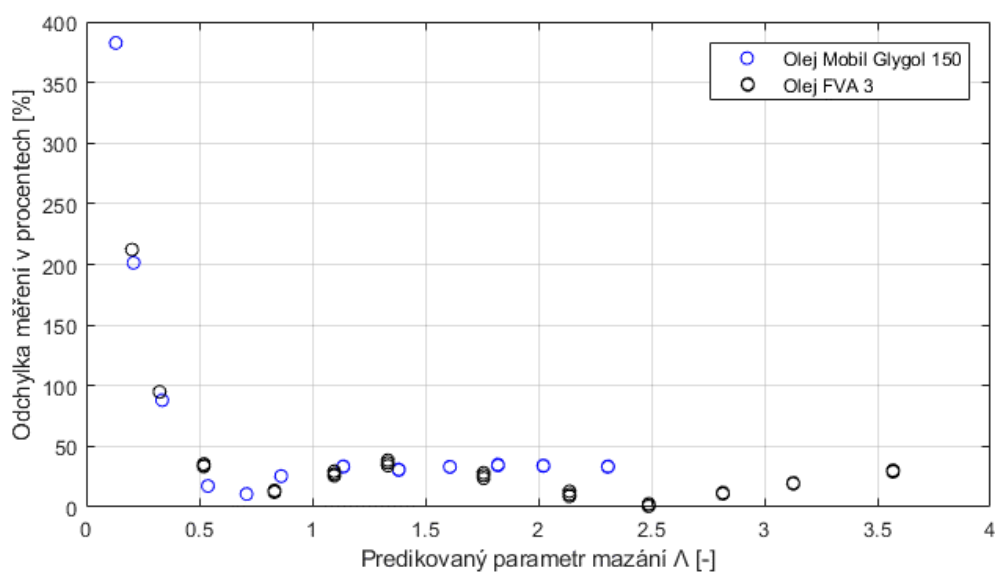


Dále je parametr mazání měřen pomocí četnosti dotyků na *obvodu 2*. Z výsledných dat (Obr. 5-56) vyplývá, že charakteristika měřených množství hodnot, v definovaném intervalu -0,1 až 0,1 V (viz kap. 5.4.1), se pro jednotlivé oleje liší.

Obr. 5-55 Metodou změřený parametr mazání k četnosti hodnot



Obr. 5-56 Predikovaný parametr mazání k četnosti hodnot



Obr. 5-57 Odchylky měření dle různých olejů

Přes viditelnou odlišnost mezi hodnotami v Obr. 5-56, dosahuje v rozsahu parametru mazání 0,5 až 2,5 přesnost měření pro olej *FVA 3* do 40 % (viz Obr. 5-57).

Měření dle četnosti dotyků není změnou oleje výrazně ovlivněno, avšak měření dle kapacity kontaktu není možné vzhledem k velmi odlišným hodnotám kapacit.

## 6 DISKUZE

V průběhu řešení diplomové práce bylo navrženo a zkonstruováno testovací zařízení a měřicí řetězec sloužící k hodnocení režimu mazání ve valivém ložisku.

Na základě rešeršní části práce, která se věnovala rozboru různých monitorovacích metod mazaného kontaktu, byly vybrány dvě principiálně odlišné elektrické monitorovací metody. První metodou je monitorování dotyků výstupků kontaktních ploch pomocí hodnoty odporu změřeného na mazaném kontaktu. Druhá metoda je založena na připodobnění kontaktních oblastí k deskám kondenzátoru a vyčíslením elektrické kapacity kontaktu. U obou zmíněných metod je zjištěna určitá veličina, odpor nebo kapacita. Tuto veličinu je nutné přiřadit k ověřenému parametru mazání. U valivého ložiska je však parametr mazání pouze predikovaný, a proto byl pro prvotní měření využit tribometr *ball-on-disk* s měřením tloušťky mazacího filmu pomocí *kolorimetrické interferometrie*. Změřená tloušťka mazacího filmu byla poté přepočítána na ověřený režim mazání. Na základě těchto prvotních testů na tribometru byly navrženy tři obvody, každý z těchto obvodu je možné použít s různou úspěšností na měření kapacity kontaktu a na měření četnosti dotyků kontaktních ploch. Na základě prvotních měření byl vybrán *obvod 2* pro další aplikaci na měřicí zařízení.

Testovací zařízení je navrženo a vyrobeno kvůli implementaci měřicího řetězce. Jeho hlavní částí je uložení testovaného ložiska. Ložiska, jehož kontakty jsou podrobeny monitorování. Úskalí aplikace vybraných elektrických metod tkví v nutnosti specifických konstrukčních požadavků na uložení a úpravy testovaného valivého ložiska. Avšak výhodou výběru těchto dvou elektrických metod je jejich vzájemná zaměnitelnost, neboť obě metody vyžadují totožné konstrukční požadavky na uložení ložiska. Hlavním konstrukčním prvkem nutným pro použitelnost je zajištění spojení elektrického obvodu s pohybujícím se vnitřním ložiskovým kroužkem. Dle rozboru použitelných řešení byl vybrán pro zajištění elektrického spojení rtuťový rotační konektor. Dalším důležitým konstrukčním prvkem týkajícím se měřicího řetězce je nutnost elektrické izolace ložiska. Ta byla vyřešena vložkami z materiálu nylon 6 (PA 6). Kromě nároků na měřicí zařízení kladeného od měřicího řetězce je na testovací zařízení kladeno hned několik dalších požadavků. Mezi tyto požadavky patří kompatibilita zařízení pro měření axiálního i radiálního testování ložiska, vyvození předepsaného zatížení, předepsané otáčky vnitřního kroužku ložiska, maximální rozměry zařízení, možnost vyhřívání testovaného ložiska, využitelnost více způsobů mazání ložiska (plastické mazivo, mazání broděním), snadná výměna oleje a snadná demontáž testovaného ložiska.

Pomocí měřicího řetězce (*obvod 2*) byl změřen parametr mazání s přesností 20 %, jedná se o relativně velikou odchylku v měření a lze doporučit další zpřesňování metody. Ale i přes danou odchylku je možné dle metody určit obecnou informaci o množství dotyků a posoudit, o jaký režim mazání se přibližně rovná. Na závěr práce byl také zkoumán vliv teploty a vliv typu oleje. Změna teploty se ukázala z pohledu měření jako nevýznamná, ovšem změna typu oleje z *Mobil Glygoyle 150*, který byl používán u většiny měření na testovacím zařízení, na *FVA 3* způsobil odlišnou charakteristiku závislosti mezi kapacitou a parametrem mazání. Jiná závislost je pravděpodobně způsobena odlišnou permitivitou oleje. Což znamená, že závislostní funkci užívanou pro měření dle kapacity kontaktu je nutné specificky definovat pro konkrétně používaný olej.

## 7 ZÁVĚR

Samotný vývoj metody pro hodnocení režimu mazání ve valivém ložisku lze rozdělit na dvě části, a to na návrh monitorovacích řetězců režimu mazání a na konstrukci testovacího zařízení s kuličkovým ložiskem, na které budou tyto metody aplikovány.

Na základě vybrané metody měření parametru mazání je nejprve zkonstruováno testovací zařízení. Dané zařízení má několik klíčových konstrukčních prvků, které musely být splněny, aby bylo hodnocení režimu mazání úspěšné. Následně byly dle poznatků z rešerše a podle prvotních testů na tribometru *ball-on-disk* navrženy tři obvody. Každý z těchto obvodů byl zkonstruován tak, aby byl schopen zaznamenat interakci kontaktních ploch mazaného kontaktu a aby dle něho bylo možné určit kapacitu. Dle úspěšnosti měření na tribometru byl vybrán *obvod 2* a byl implementován na testovací zařízení.

Nakonec byly provedeny ověřovací testy, podle kterých byly úspěšně naměřeny parametry mazání v testovaném valivém ložisku. Dodatečně byl studován vliv teploty oleje a jeho typu. Vliv teploty oleje na měření byl shledán jako nepodstatný, avšak změna typu oleje výrazně ovlivňuje kapacitu kontaktu kvůli své rozdílné permitivitě. Přesnost měření v tomto stádiu vývoje není podle mého úsudku dostatečná, a proto doporučuji další vývoj s cílem zvýšení přesnosti měření.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Object moved*. Dostupné z: <https://iam.innogy.com/en/about-innogy/innogy-innovation-technology/renewables/offshore/gwynt-y-mr-offshore-wind-farm>
- [2] ANDERSON, William J. Rolling-Element Bearings. 1983, č. June.
- [3] HAMROCK, Bernard J, Steven R SCHMID a Bo O JACOBSON. *TOC: Fundamental of Fluid Film Lubrication Second Edition*. 2004. ISBN 0824753712.
- [4] BEČKA, Jan. *Tribologie*. B.m.: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01621-8.
- [5] KOYE, K. A. An Experimental Evaluation of the Hamrock and Dowson Minimum Film Thickness Equation for Fully Flooded EHD Point Contacts. *Journal of Tribology*. 2013, roč. 103, č. 2, s. 284. ISSN 0742-4787.
- [6] POLI, Radek a Martin HARTL. Aplikace barevného vidění při studiu elastohydrodynamického mazání. 2004.
- [7] AR., Wilson. The relative film thickness of grease and oil films in rolling bearings. *Proc Inst Mech Eng*. 1979, roč. 193, s. 185–92.
- [8] JABLONKA, Karolina, Romeo GLOVNEA a Jeroen BONGAERTS. Evaluation of EHD films by electrical capacitance. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012, roč. 45, č. 38. ISSN 00223727.
- [9] WITTEK, Eike Christian, Michael KRIESE, Hans TISCHMACHER, Sven GATTERMANN, Bernd PONICK a Gerhard POLL. Capacitances and lubricant film thicknesses of motor bearings under different operating conditions. *19th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010*. 2010, s. 0–5.
- [10] DWYER-JOYCE, R., T. REDDYHOFF a B. DRINKWATER. Operating limits for acoustic measurement of rolling bearing oil film thickness. *Tribology Transactions*. 2004, roč. 47, č. 3, s. 366–375. ISSN 10402004.
- [11] DWYER-JOYCE, R. S., B. W. DRINKWATER a C. J. DONOHOE. Article : The measurement of lubricant- film thickness using ultrasound. 2003.
- [12] HAMROCK, B. J. a D. DOWSON. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts: Part III—Fully Flooded Results. *Journal of Lubrication Technology*. 2010, roč. 99, č. 2, s. 264. ISSN 00222305.
- [13] ZKL GROUP. *Vady s poškození ložisek*. 2012. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/11-vady-s-poskozeni-lozisek>
- [14] SCHREIER, Jan. *Základní příčiny poškození valivých ložisek a jejich diagnostika*. B.m., 2010. VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNE.
- [15] COROLL S. R. O. *Analýza poškození ložisek*. Dostupné z: <https://www.coroll.cz/analiza-poskozeni-lozisek.html>
- [16] BARON, Petr, Marek KOČIŠKO a Jozef DOBRÁNSKY. The dynamic parameters correlation assessment of the textile machine high-speed bearings in changed technological conditions. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2018, roč. 116, č. September 2017, s. 575–585. ISSN 02632241.

- [17] DIF S.R.O. *Monitorovací systém teplot stroje*. 2019. Dostupné z: <https://www.dif.cz/aktuality/monitorovaci-system-teplot-stroje/>
- [18] SKF CZ, a.s. *Vibration measurement tools*. 2019. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/products/condition-monitoring/basic-condition-monitoring-products/vibration-measurement-tools/index.html>
- [19] LEE, Greg. Reliable Shock Pulse Evaluation of Anti-Friction Bearing Condition. *PUMPS & SYSTEMS*. 2011.
- [20] HANSEN, Jonny, Marcus BJÖRLING a Roland LARSSON. Mapping of the lubrication regimes in rough surface EHL contacts. *Tribology International*. 2019, roč. 131, č. October 2018, s. 637–651. ISSN 0301679X.
- [21] HEEMSKERK, R. S., K. N. VERMEIREN a H. DOLFSMA. Measurement of lubrication condition in rolling element bearings. *ASLE Transactions*. 1982, roč. 25, č. 4, s. 519–527. ISSN 05698197.
- [22] XIE, Kai, Long Chao LIU, Xiao Ping LI a Han Lu ZHANG. Non-contact resistance and capacitance on-line measurement of lubrication oil film in rolling element bearing employing an electric field coupling method. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2016, roč. 91, s. 606–612. ISSN 02632241.
- [23] MAGDUN, Oliver a Andreas BINDER. Calculation of roller and ball bearing capacitances and prediction of EDM currents. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*. 2009, s. 1051–1056.
- [24] ZHANG, Xing Nan, Karolina JABLONKA a Romeo GLOVNEA. Experimental Rig for Measuring Lubricant Film Thickness in Rolling Bearings. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, roč. 658, s. 381–386.
- [25] LANE, T. B. a J. R. HUGHES. A study of the oil-film formation in gears by electrical resistance measurements. *British Journal of Applied Physics*. 1952, roč. 3, č. 10, s. 315–318. ISSN 05083443.
- [26] LIU, De Liang, Shu Hua CAO, Shi Feng ZHANG a Jiu Jun XU. Lubrication film thickness calculation from contact resistance measurement in point contact. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2016, roč. 68, č. 2, s. 176–182. ISSN 00368792.
- [27] JABLONKA, Karolina, Romeo GLOVNEA a Jeroen BONGAERTS. Quantitative measurements of film thickness in a radially loaded deep-groove ball bearing. *Tribology International*. 2018, roč. 119, č. October 2017, s. 239–249. ISSN 0301679X.
- [28] FURTMANN, Alexander a Gerhard POLL. Evaluation of Oil-Film Thickness Along the Path of Contact in a Gear Mesh by Capacitance Measurement. *Tribology Online*. 2016, roč. 11, č. 2, s. 189–194.
- [29] JABLONKA, Karolina, Romeo GLOVNEA, Jeroen BONGAERTS a Guillermo MORALES-ESPEJEL. The effect of the polarity of the lubricant upon capacitance measurements of EHD contacts. *Tribology International*. 2013, roč. 61, s. 95–101. ISSN 0301679X.
- [30] CEN, Hui a P.M. LUGT. Replenishment of the EHL contacts in a Grease Lubricated Ball Bearing. *Tribology International*. 2019, roč. submitted, č. September, s. 106064. ISSN 0301-679X.

- [31] CEN, Hui a Piet M. LUGT. Film thickness in a grease lubricated ball bearing. *Tribology International*. 2019, roč. 134, č. January, s. 26–35. ISSN 0301679X.
- [32] WIKSTRÖM, V. a B. JACOBSON. Loss of lubricant from oil-lubricated near-starved spherical roller bearings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 1997, roč. 211, č. 1, s. 51–66. ISSN 13506501.
- [33] DYSON, A. The Measurement of Oil-Film Thickness in Elastohydrodynamic Contacts. 1965.
- [34] GASNI, D., M. K. WAN IBRAHIM a R. S. DWYER-JOYCE. Measurements of lubricant film thickness in the iso-viscous elastohydrodynamic regime. *Tribology International*. 2011, roč. 44, č. 7–8, s. 933–944. ISSN 0301679X.
- [35] WAN IBRAHIM, M. K., D. GASNI a R. S. DWYER-JOYCE. Profiling a Ball Bearing Oil Film with Ultrasonic Reflection. *Tribology Transactions*. 2012, roč. 55, č. 4, s. 409–421. ISSN 10402004.
- [36] ZHANG, Kai, Tonghai WU, Qinghu MENG a Qingfeng MENG. Ultrasonic measurement of oil film thickness using piezoelectric element. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, roč. 94, č. 9–12, s. 3209–3215. ISSN 14333015.
- [37] CHEN, Yuping, Xiaodong ZHANG, Ping ZHANG a Chunxiang LIU. Lubricant film thickness measurement using fiber-optic Michelson Interferometer and fiber-optic displacement sensor. *2009 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2009*. 2009, s. 951–956.
- [38] ZHANG, Xiaodong, Wenjie BAI a Yuping CHEN. An approach for accurate measurement of lubricant film thickness based on fiber-optical displacement sensor. *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2007*. 2007, s. 3015–3019.
- [39] DVOŘÁČEK, Ondřej, Petr ŠPERKA, David HRUBOŠ, Patrik KLUS a Michal NOŽKA. Vysoké učení technické v Brně Konstrukce simulátoru radiálního ložiska se safírovými kroužky. 2017.
- [40] GURÁŇ, Radoslav, Petr ŠPERKA, Lukáš HALAMA, Jiří KOČÁŘ a Michal VODEHNAL. NÁVRH TESTERU LOŽISEK PRO POZOROVÁNÍ MAZIVA. 2019.
- [41] CARBEX AB. *Carbon brush holders*. Dostupné z: <https://carbonbrushsolution.com/carbon-brush-holders/>
- [42] ROTARY SYSTEMS INC. *SR006 Series*. 2015. Dostupné z: <https://rotarysystems.com/slip-rings/product/10-amps-to-150-vdc-separates-2/>
- [43] WIKIPEDIA.ORG. *Metal liquid slip rings mercury*. 2019. Dostupné z: <https://wikipedia.org>
- [44] NETME CENTRE. Vědecká centra VUT představí svoje aktivity firmám. *Novinky*. 2017. Dostupné z: <http://netme.cz/cs/author/netme/page/4/>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

$U$	napětí [V]
$C$	kapacita [F]
$R$	elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$I$	elektrický proud [A]
$X$	reaktance [ $\Omega$ ]
$X_c$	kapacitance [ $\Omega$ ]
$\lambda$	parametr mazání [-]
$H_c$	centrální tloušťka mazacího filmu [m]
$H_{min}$	minimální tloušťka mazacího filmu [m]
$R_a$	střední aritmetická úchylka profilu [ $\mu\text{m}$ ]
$R_q$	průměrná kvadratická úchylka [ $\mu\text{m}$ ]
$u$	relativní rychlost valení [m/s]
$\alpha$	koeficient maziva [1/Pa]
$\eta$	dynamická viskozita [(N·s)/m <sup>2</sup> ]
$\mu$	Poissonovo číslo [-]
$E$	Youngův modul [Pa]
$E'$	efektivní Youngův modul [Pa]
$R'$	redukovaný poloměr [m]
$R_y, R_x$	redukovaný poloměr ve směru osy $y/x$ [m]
$F, P$	síla [N]
$T$	perioda [s]
$t$	čas [s]



$\varepsilon$	permitivita [F/m]
$\varepsilon_0$	permitivita vakua [F/m]
$\varepsilon_r$	permitivita dielektrika [F/m]
$A$	obsah dvou paralelních ploch [m <sup>2</sup> ]
$\tau$	nabíjecí konstanta [F·Ω]
$f$	frekvence [Hz]
$R$	akustický koeficient odrazu [-]
$z$	akustická impedance [Pa·s/m]
$C$	základní dynamická únosnost [N]
$M_o$	ohybový moment [N.mm]
$W_o$	průřezový modul [mm <sup>3</sup> ]
$D$	průřez [mm]
$\sigma_o$	napětí [MPa]
$\alpha$	součinitel tvaru [-]
$k$	bezpečnost [-]
$Re$	mez pevnosti materiálu [Pa]

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Větrné elektrárny na moři [38].....	13
Obr. 2-1 Konformně (vlevo) a nekonformně (vpravo) zakřivené třecí povrchy [32].....	14
Obr. 2-2 EHD kontaktní oblasti A) ball-on-disku a B) radiálního ložiska [32].....	14
Obr. 2-3 Stribeckova křivka, parametr mazání [30].....	15
Obr. 2-4 Elastohydrodynamický kontakt [31].....	16
Obr. 2-5 Elastohydrodynamický kontakt na kolorometrické interferometrii [35] .....	16
Obr. 2-6 Distribuce zatížení v ložisku [1].....	17
Obr. 2-7 Vibrace ložiska za čas [39].....	20
Obr. 2-8 Princip metody SPM (Shock Pulse Method) [59].....	21
Obr. 2-9 Elektrický obvod na základě odporového děliče [55] .....	22
Obr. 2-10 Zapojení měřicího obvodu na tribometru ball-on-disk [18].....	23
Obr. 2-11 Kontaktní odpor pro čtyři zatížení zaznamenané krátce po rozjezdu [45].....	24
Obr. 2-12 Odpor kontaktu v závislosti na otáčkách ložiska [12] .....	24
Obr. 2-13 Schéma kapacit radiálního valivého ložiska [1] .....	25
Obr. 2-14 Nabíjecí charakteristika [4].....	26
Obr. 2-15 Měření pomocí můstkového zapojení [1] .....	27
Obr. 2-16 SKF Lubcheck [55] .....	27
Obr. 2-17 Experimentální zařízení [9] .....	28
Obr. 2-18 Kapacita na tloušťce olejového filmu (vlevo), tloušťka olejového filmu dle různých metod [6] .....	29
Obr. 2-19 Schéma zapojení ultrazvukového senzoru [5] .....	30
Obr. 2-20 Ultrazvukové testovací zařízení [2] .....	31
Obr. 2-21 Srovnání výsledků ultrazvukového měření tloušťky maziva v kontaktu [19] ...	31
Obr. 2-22 Zaostření ultrazvukového paprsku [7].....	32
Obr. 2-23 Schéma optického interferometru s optickým vláknem [3] .....	33
Obr. 2-24 Napětí na foto senzoru vůči tloušťce mazacího filmu [47].....	34
Obr. 4-1 Tester projekt ZIP 2017 [48] .....	39
Obr. 4-2 Tester projekt ZIP 2019 [49] .....	40

Obr. 4-3 Uložení testovaného ložiska v projektu ZIP 2017 [48] .....	41
Obr. 4-4 Uložení testovaného ložiska v projektu ZIP 2019 [49] .....	41
Obr. 4-5 Koncepční schéma testovacího zařízení.....	42
Obr. 4-6 Koncepční schéma domku s testovaným ložiskem.....	42
Obr. 4-7 Uhlíkový kartáč [50] .....	43
Obr. 4-8 Slip ring s otvorem (vlevo) a slip ring koncový (vpravo) [51] .....	44
Obr. 4-9 Rotační konektor na bázi kovu [53].....	44
Obr. 4-10 Zajištění pomocí šroubu A .....	45
Obr. 4-11 Zajištění pomocí šroubu B .....	46
Obr. 4-12 Zajištění pomocí matice .....	46
Obr. 4-13 Směry zatěžování (Pneumatický válec).....	47
Obr. 4-14 Optický tribometr ball-on-disk [54].....	49
Obr. 4-15 Rotační konektory a jejich upevnění.....	50
Obr. 4-16 Schéma konstrukční úpravy tribometru.....	50
Obr. 5-1 Schéma testovacího zařízení.....	51
Obr. 5-2 Základní rozměry .....	52
Obr. 5-3 Domek testovaného ložiska.....	53
Obr. 5-4 Geometrie přerušené izolační vložky.....	54
Obr. 5-5 Ohřev (ANSYS Workbench).....	55
Obr. 5-6 Graf udávající závislosti Yangova modulu a Poissonova čísla na teplotě (ANSYS Workbench) .....	56
Obr. 5-7 Nelineární charakteristika nylonu 6 (ANSYS Workbench) .....	56
Obr. 5-8 Zavazbení celku (nahore) a zatížení silami (dole) (ANSYS Workbench).....	57
Obr. 5-9 Výpočtová síť pro výpočet izolačních vložek (ANSYS Workbench) .....	58
Obr. 5-10 Napětí na vnitřních vložkách dle geometrie a montáže .....	59
Obr. 5-11 Napětí na vnějších vložkách dle geometrie a montáže .....	60
Obr. 5-12 Napětí na vnějším kroužku (ANSYS Workbench) .....	61
Obr. 5-13 Napětí na vnitřním kroužku (ANSYS Workbench) .....	61
Obr. 5-14 Ložiskové těleso .....	62
Obr. 5-15 Silové zatížení .....	63

Obr. 5-16 Nebezpečné místa na hřídeli vůči bezpečnosti .....	64
Obr. 5-17 Síly a momenty na hřídeli.....	64
Obr. 5-3 Pneumatický obvod .....	66
Obr. 5-18 Výpočtová síť celku (ANSYS Workbench).....	67
Obr. 5-19 Ohřev celek (ANSYS Workbench).....	68
Obr. 5-20 Ohřev domek (ANSYS Workbench).....	68
Obr. 5-21 Schéma - Obvod 1 .....	69
Obr. 5-22 Ilustrační průběh měření na ložisku pomocí obvodu 1 .....	70
Obr. 5-23 Schéma - Obvod 2 .....	72
Obr. 5-24 Ilustrační průběh měření na ložisku pomocí obvodu 2 .....	73
Obr. 5-25 Ilustrační distribuce dat zařazena do intervalů a určena četnost (Histogram) ...	75
Obr. 5-26 Ilustrační histogram s výběrem úseku pro měření.....	77
Obr. 5-27 Obvod 3 .....	78
Obr. 5-28 Ilustrační průběh měření na tribometru pomocí obvodu 3 .....	79
Obr. 5-29 Graf minimální tloušťky maziva / parametru mazání k průměrnému napětí na kontaktu .....	83
Obr. 5-30 Graf parametru mazání k průměrnému odporu kontaktu .....	84
Obr. 5-31 Graf odchylky v napětí mezi daty a proloženou funkcí .....	85
Obr. 5-32 Odchylky v měření obvod 1 četnost dotyků.....	85
Obr. 5-33 Graf měřeného k ověřenému parametru mazání – Obvod 1 .....	86
Obr. 5-34 Graf minimální tloušťky maziva / parametru mazání k množství hodnot ve výběru [-].....	87
Obr. 5-35 Graf odchylky v množství hodnot mezi daty a proloženou funkcí .....	88
Obr. 5-36 Odchylky v měření obvod 2 četnost dotyků.....	88
Obr. 5-37 Graf měřeného k ověřenému parametru mazání – Obvod 2 (četnost).....	89
Obr. 5-38 Vstupní napěťový signál pro posouzení způsobu zjištění amplitudy .....	90
Obr. 5-39 Amplituda napěťového signálu zjištěná soustavou rovnic .....	91
Obr. 5-40 Amplituda napěťového signálu zjištěná pomocí histogramu .....	91
Obr. 5-41 Graf kapacity kontaktu dle <i>obvodu 2</i> a <i>obvodu 3</i> na minimální tloušťce maziva / parametru mazání.....	93
Obr. 5-42 Přesnost kalibračních a referenčních kondenzátorů obvodu 2 a 3 .....	94

Obr. 5-43 Graf odchylky kapacity kontaktu k proložené funkci.....	95
Obr. 5-44 Odchylky v měření obvod 2 dle kapacity kontaktu.....	95
Obr. 5-45 Graf měřeného k ověřenému parametru mazání – obvod 2 (kapacita).....	96
Obr. 5-46 Graf predikovaného parametru mazání k četnosti hodnot z výběrového intervalu .....	98
Obr. 5-47 Odchylky v měření obvod 2 dle měření četnosti .....	99
Obr. 5-48 Graf měřeného k predikovanému parametru mazání – obvod 2 (četnost).....	99
Obr. 5-49 Graf kapacity kontaktu dle obvodu 2 parametru mazání .....	100
Obr. 5-50 Odchylky v měření obvod 2 dle měření kapacity .....	101
Obr. 5-51 Celkové porovnání změřených parametrů mazání k predikovaným.....	102
Obr. 5-52 Predikovaný parametr mazání s kapacitou kontaktu .....	103
Obr. 5-53 Odchylky měření za zvýšené teploty .....	103
Obr. 5-54 Predikovaný parametr mazání s kapacitou kontaktu .....	104
Obr. 5-55 Metodou změřený parametr mazání k četnosti hodnot .....	105
Obr. 5-56 Predikovaný parametr mazání k četnosti hodnot .....	105
Obr. 5-57 Odchylky měření dle různých olejů .....	105
Obr. 0-1 Celé izolační kroužky bez vůle (A) a s vůlí (B) (ANSYS Workbench) .....	119
Obr. 0-2 Přerušené izolační kroužky bez vůle (C) a s vůlí (D) (ANSYS Workbench) .....	120

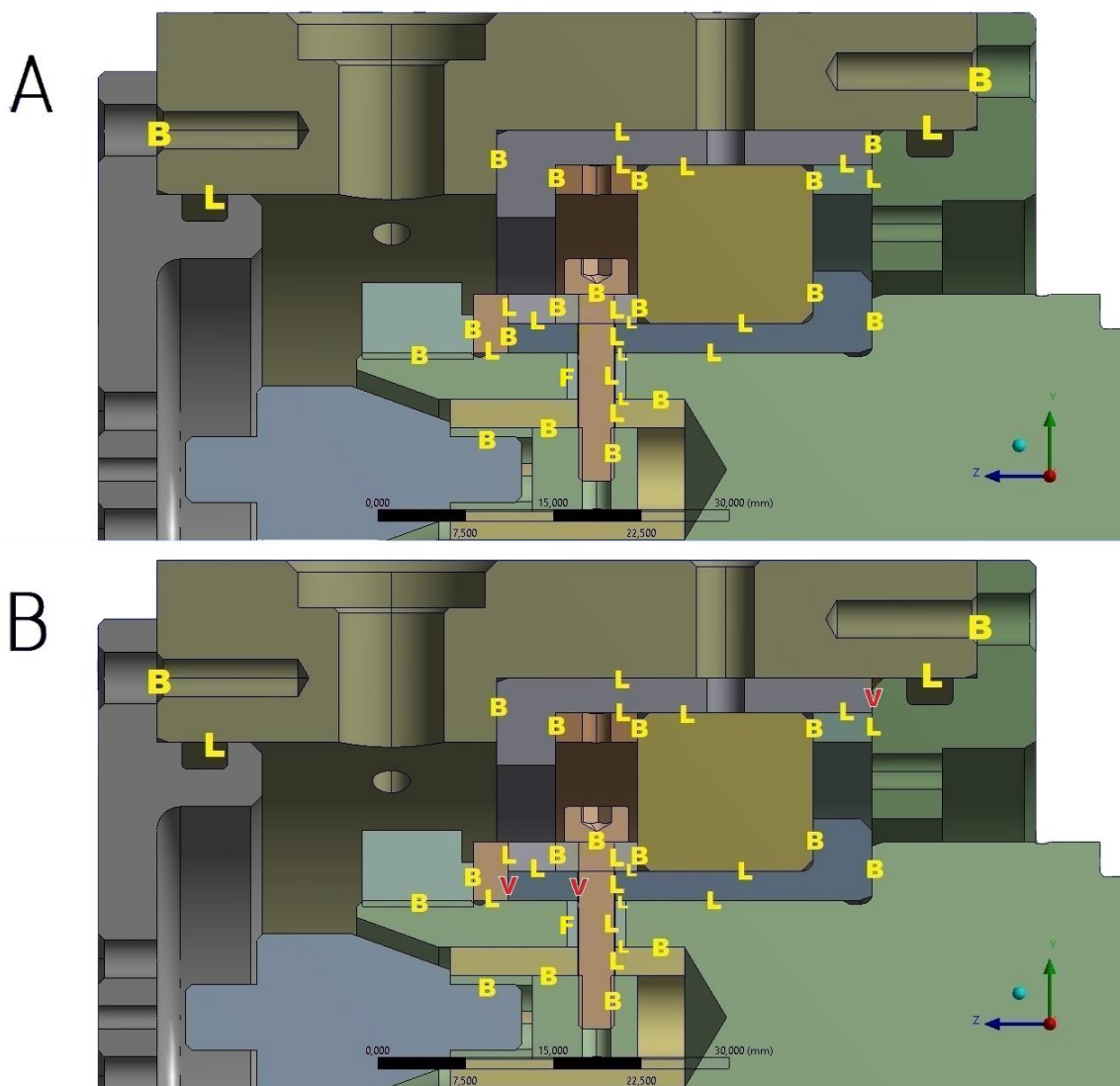
## 11 SEZNAM TABULEK

<b>tab. 4-1</b>	Vybrané materiály .....	48
<b>tab. 5-1</b>	Základní parametry .....	52
<b>tab. 5-2</b>	Pneumatický válec - info .....	66
<b>tab. 5-3</b>	Veličiny měření na tribometr ball-on-disk .....	82
<b>tab. 5-4</b>	Veličiny měření testovacího zařízení.....	97

# PŘÍLOHA 1

Varianty vazeb dle geometrie a vřlí lze dělit:

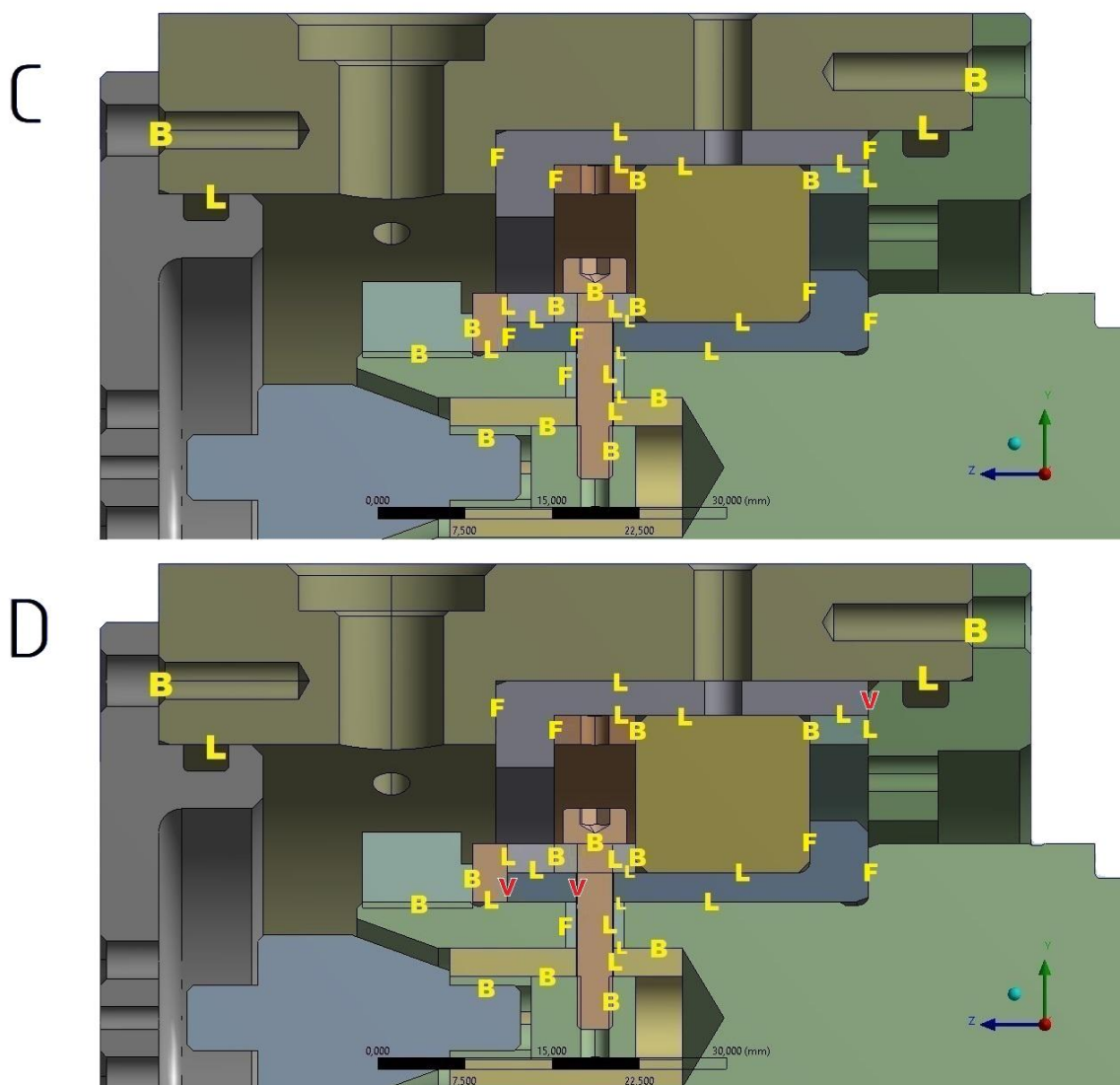
- Celé izolační kroužky bez vřlí, viz Obr. 0-1 A.
- Celé izolační kroužky s vřlí, viz Obr. 0-1 B.



Obr. 0-1 Celé izolační kroužky bez vřlí (A) a s vřlí (B) (ANSYS Workbench)

Jednotlivé vazby na obrázcích jsou označeny značkami, kde značka *B* označuje vazbu *Bounded*, značka *F* označuje vazbu *Frictional* s koeficientem tření 0,4, značka *L* označuje vazbu *Frictionless*, značka *V* označuje místo bez vazby.

- Přerušené izolační kroužky bez vůle, viz Obr. 0-2.
- Přerušené izolační kroužky s vůlí, viz Obr. 0-2.



Obr. 0-2 Přerušené izolační kroužky bez vůle (C) a s vůlí (D) (ANSYS Workbench)

Jednotlivé vazby na obrázcích jsou označeny značkami stejnými jako u předchozího obrázku, kde značka *B* označuje vazbu *Bounded*, značka *F* označuje vazbu *Frictional* s koeficientem tření 0,4, značka *L* označuje vazbu *Frictionless*, značka *V* označuje místo bez vazby.